

**APLICATIVO PARA EL ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN  
SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPT) APLICANDO EL MODELO DE DOS  
CAPAS.**

**TRONCOSO MENDOZA SONNI ALEXANDER**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
BARRANQUILLA**

**2014**

**APLICATIVO PARA EL ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN  
SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPT) APLICANDO EL MODELO DE DOS  
CAPAS.**

**TRONCOSO MENDOZA SONNI ALEXANDER**

Trabajo de grado para optar el título de:  
**INGENIERO ELÉCTRICO**

Asesor,  
ING. LAURA HINESTROZA OLASCUAGA

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
BARRANQUILLA**

**2014**

## HOJA DE ACEPTACIÓN

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

**Jurado**

---

**Jurado**

Barranquilla, 02 de Abril del 2014

Barranquilla, 02 de Abril del 2014

**Aceptación del Asesor**

Certifico con mi firma que apruebo la entrega del informe final del proyecto de grado titulado “**APLICATIVO PARA EL ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPT) APLICANDO EL MODELO DE DOS CAPAS**” el cual es presentado por el estudiante de Ingeniería Eléctrica SONNI ALEXANDER TRONCOSO MENDOZA identificado con Cédula de Ciudadanía No 1'140.851.521 de Barranquilla, como requisito para optar al Título de Ingeniero Eléctrico.

---

Ing. Laura Hinestroza Olascuaga  
Docente Tiempo Completo



## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo principalmente a Dios, Padre incondicional que nunca me abandona, a mi abuela Lucia Barrios, a mi madre Osiris Mendoza y a mi padre Alexander Troncoso por ese apoyo incondicional que me brindaron desde que comencé este proceso de formación profesional, a mis hermanos Cindy, Blass y Laura Troncoso por ser ese motor que me impulsa todos los días a mejorar en todos los aspectos de mi vida.

Sonni Alexander Troncoso Mendoza

## **AGRADECIMIENTOS**

**A**l realizar este proyecto agradezco.

**A** Dios por la Sabiduría, Inteligencia y herramientas que me brindó para la culminación de mi carrera como profesional.

**A** mi Familia por su comprensión y apoyo.

**A** mis Profesores por esa transferencia de conocimientos.

**A** la Docente Laura Hinestroza Olascuaga por su asesoría para la elaboración de este proyecto.

**A** toda la comunidad educativa de la Universidad de la Costa por ser ese Ente de Formación Académica el cual me brindó las bases necesarias para el desarrollo de trabajo y donde logré un desarrollo integral como Ingeniero.

## **RESUMEN**

El Sistema de Puesta a Tierra (SPT), es una parte importante de todo sistema eléctrico, debido a que proporcionar un medio para la disipación de la corriente eléctrica bajo condiciones normales o de cortocircuito, ofreciendo protección a equipos y personas en las cercanías. Para el presente proyecto, el Aplicativo para el Diseño de un SPT será dividido en dos secciones, Un estudio técnico y un estudio económico. El estudio técnico comprenderá el análisis de los parámetros tanto físicos como propiamente eléctricos que intervienen en el cálculo, entre los cuales se puede hacer mención, el Método de Medición de la Resistividad del terreno y la selección de un modelo adecuado para el análisis de las mediciones del suelo (modelo de suelo). Mientras que el estudio económico permitirá conocer los costos de los materiales utilizados calculados a lo largo del Estudio técnico que componen un SPT y algunos elementos que se utilizarán.

## **PALABRAS CLAVES.**

Sistema de Puesta a Tierra, Mediciones, Corriente Eléctrica, Resistividad del Suelo, Modelo de Suelo, Costos.



## **ABSTRACT**

The System of Earthing (SPT), is an important part of any electrical system, due to the fact that to provide a way for the dissipation of the electrical current under normal conditions or of short circuit, offering protection to equipments and people present in the surroundings. For the present project, the Applicative one for the Design of a SPT it will be divided in two sections, a technical study and an economic study. The technical study will understand the analysis of the both physical and properly electrical parameters that intervene in the calculation, between which it is possible to mention, the Method of Measurement of the Resistivity of the area and the selection of a model adapted for the analysis of the measurements of the soil (model of soil). Whereas the economic study will allow knowing the costs of the used materials calculated along the technical Study that compose a SPT and some elements that will be in use.

## **KEY WORDS**

System of Earthing, Measurements, Electrical current, Resistivity of the soil, Model of soil, Costs.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	15
1. DATOS DEL PROYECTO.....	16
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	16
1.1.1 JUSTIFICACIÓN.....	17
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.2.1 OBJETIVO GENERAL .....	19
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1.3 LIMITACIONES Y ALCANCE .....	20
1.4 PROCESO METODOLÓGICO .....	21
1.4.1 PLAN DE TRABAJO .....	22
1.5 ANTECEDENTES.....	24
2. ESTUDIO TÉCNICO (MARCO TEÓRICO) .....	27
2.1 CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UN SPT.....	27
2.1.1 Parámetros críticos .....	27
2.2 EL SUELO Y SU RESISTIVIDAD .....	35
2.2.1 RESISTIVIDAD DEL SUELO .....	35
2.2.2 MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO.....	41
2.2.3 INTERPRETACIÓN DE MEDIDAS DE RESISTIVIDAD .....	49
2.3 CALIBRE DEL CONDUCTOR .....	54
2.3.1 Cálculo del calibre del conductor .....	54
2.3.2 Selección del Tipo de conductor .....	58
2.4 CRITERIOS DE Tensión DE PASO Y DE CONTACTO .....	60
2.4.1 Tensión de paso .....	61
2.4.2 Tensión de Contacto .....	63
2.5 DISEÑO PRELIMINAR .....	65
2.5.1 Factor geométrico .....	66
2.5.2 Factor de corrección de la malla .....	67
2.5.3. Factor para efectos de a profundidad .....	67

2.5.4	Número efectivo de conductores .....	67
2.5.5	Factor de Irregularidad.....	69
2.5.6	Longitud efectiva de cables y varillas.....	70
2.6	EVALUACIÓN DE RESISTENCIA DE TIERRA .....	70
2.6.1	Cálculos simplificados.....	71
2.6.2	Ecuaciones de Schwarz.....	72
2.7	ELEVACIÓN DE POTENCIAL A TIERRA (GPR).....	75
2.8	CÁLCULO DE LA TENSIÓN MÁXIMA DE LA MALLA Y TENSIÓN REAL DE PASO.....	76
2.8.1	Tensión máxima de malla, $E_m$ .....	76
2.8.2	Tensión real de paso, $E_s$ .....	77
3.	DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....	78
Paso 1.	Datos del terreno .....	79
Paso 2.	Cálculo del Calibre del Conductor .....	79
Paso 3.	Calcular las tensiones de toque y de paso .....	79
Paso 4.	Diseño Preliminar .....	79
Paso 5.	Determinar la Resistencia de la Malla .....	80
Paso 6.	Cálculo de Corriente máxima a disipar por la malla:.....	80
Paso 7.	Cálculo de GPR y comparación con valor de $E_t$ .....	81
Paso 8.	Cálculo de tensión máxima de malla y real de paso .....	81
Paso 9.	Comparar valores de Tensión de contacto .....	81
Paso 10.	Comparar valores de tensión de paso .....	82
Paso 11.	Revisión del Diseño preliminar .....	82
Paso 12.	Refinamiento del diseño .....	82
4.	APLICATIVO PARA EL ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO .....	83
4.1	PROGRAMA A UTILIZAR.....	83
4.2	DISEÑO DEL APLICATIVO .....	84
4.3	VALIDACIÓN DEL ESTUDIO TÉCNICO DEL APLICATIVO .....	89
4.4	ESTUDIO ECONÓMICO.....	93
	CONCLUSIONES .....	95
	RECOMENDACIONES.....	97
	BIBLIOGRAFÍA.....	98

ANEXOS.....	103
ANEXO A. MANUAL DE USO PARA EL APLICATIVO DEL ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPT) APLICANDO EL MODELO DE DOS CAPAS.....	15

## LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Rango de resistividad del suelo. ....	33
Tabla 2. Resistividad de diferentes conductores .....	36
Tabla 3. Formación y Periodo geológico. Algunos valores de resistividad para diferentes rocas. ....	40
Tabla 4. Constante de materiales. ....	56
Tabla 5, Constante Kf de materiales conductores .....	57
Tabla 6. Secciones de los conductores típicos de puesta a tierra. ....	58
Tabla 7. Parámetros de entrada del aplicativo.....	85
Tabla 8. Parámetros de salida del aplicativo .....	88
Tabla 9. Datos del terreno, Validación .....	89
Tabla 10. Calibre del Conductor, Validación .....	90
Tabla 11. Factor de reducción para Criterios de Tensión .....	90
Tabla 12. Datos de diseño preliminar, Validación. ....	91
Tabla 13. Datos de Resistencia de malla, Validación. ....	91
Tabla 14, Corriente máxima, Validación .....	92
Tabla 15. Elevación de potencial, Validación.....	92
Tabla 16. Datos de tensiones, máxima de malla y real de paso.....	93

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Pág.

Ilustración 1. Proceso metodológico .....	21
Ilustración 2. Definición de Resistividad.....	36
Ilustración 3. Variación de la Resistividad del terreno con sales disueltas .....	37
Ilustración 4. Variación de la Resistividad del terreno con la humedad .....	38
Ilustración 5. Variación de la Resistividad del terreno con la temperatura.....	39
Ilustración 6. Método de cuatro puntos igualmente espaciados o Wenner .....	45
Ilustración 7. Método de cuatro puntos. Schlumberger-Palmer .....	46
Ilustración 8. Método caída de potencial.....	47
Ilustración 9. Terreno de dos capas.....	51
Ilustración 10. Método Gráfico de Sunde .....	52
Ilustración 11. Suelo multicapa. ....	53
Ilustración 12. Situaciones básicas de choque .....	61
Ilustración 13. Diseño preliminar de la malla.....	66
Ilustración 14. Coeficiente para las ecuaciones de Schwarz a) $k_1$ y b) $k_2$ .....	74
Ilustración 15. Diagrama de Procesos para el Diseño de un SPT .....	78

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como finalidad la realización de una herramienta informática, Aplicativo, utilizando el programa Microsoft Office Excel, para facilitar el estudio técnico y económico para el diseño de un Sistema de Puesta a Tierra teniendo en cuenta las Normas Internacionales ANSI/IEEE, como lo son la IEEE Std 80 – “Guide for Safety in AC Substation Grounding” y la IEEE Std 81 - “Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System” y la Normativa Nacional como el RETIE – Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas y la Norma Técnica Colombiana (NTC) 2050 acerca de los parámetros y métodos utilizados para alcanzar resultados que permitan mejores diseños, garantizando las principales funciones de un SPT.

La herramienta a desarrollar también contará con un Estudio Económico, encaminado a conocer el valor que conlleva consigo la elaboración del SPT, contemplando las actividades a desarrollar y los materiales, basado en los cálculos llevados a cabo en el Estudio Técnico.

## **1. DATOS DEL PROYECTO**

### **1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Para la realización de un Sistema de Puesta a Tierra se llevan a cabo un Estudio Técnico, dividido en las mediciones de la resistividad del terreno y un análisis del suelo utilizando los datos obtenidos de las mediciones de resistividad. Para la realización de las mediciones de resistividad existen diversas maneras de desarrollarse pero el análisis de los resultados obtenidos deben ser analizados bajo el criterio importante de la cantidad de capas del suelo, los cuales son mencionados en la norma IEEE Std 80, como lo son, el Modelo de una capa, el modelo de dos capas y el modelo multicapa. Existen en la actualidad diversos software especializados, capaces de desarrollar los cálculos de un Sistema de Puesta a Tierra, los cuales resultan ser complejos de utilizar debido a sus interfaces y además no poseen licencia libre para su uso. En la actualidad no hay software o programa que relacione los costos en un estudio económico, dando a conocer el costo de los elementos calculados para uso en el Sistema de Puesta a Tierra.

De acuerdo a la problemática anterior, se plantea el siguiente interrogante: ¿Es posible realizar una herramienta informática que basada en la IEEE Std. 80, para un Estudio Técnico, considerando el modelo de dos capas para el análisis de suelo y como método de medición el Método Wenner y agregar un estudio económico del Sistema de Puesta a Tierra?



### 1.1.1 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad por motivos de agilizar la realización de cálculos en el diseño de un SPT el modelo de una capa es el más utilizado debido a lo sencillo que resulta ser analizar las mediciones de resistividad con ecuaciones en las que las variables que intervienen directamente son menores a los otros dos modelos. Sin embargo cualquier terreno por muy homogéneo que parezca a simple vista siempre se encuentra dividido o estratificado en varias capas y cada una posee una resistividad diferente. Razón suficiente para comprender que el uso del modelo de una capa para el análisis del suelo no es suficientemente preciso para lograr un acercamiento a las características reales del mismo. Por otro lado, el modelo multicapas requiere de un modelamiento del suelo que suele ser demasiado complejo y requiere de una serie de variables que dificultan la operación. Mientras tanto el modelo de dos capas representa de manera más exacta las condiciones del suelo sin llegar a acomplejar el grado de ecuaciones utilizadas, característica que permite el acercamiento a un diseño más seguro y más acorde a la resistividad que es tan cambiante en el terreno, además de la facilidad en la implementación.

Motivos por los cuales el modelo de análisis del suelo para implementar en el estudio técnico del Sistema de Puesta a Tierra en el presente proyecto es el Modelo de dos capas. Modelo que ofrece una mayor aproximación a las condiciones reales del suelo, debido a que la resistividad del suelo varía lateralmente con respecto a la profundidad, dependiendo de la estratificación del terreno. Las bondades de implementar un modelo de dos capas, basados en la IEEE 80 garantizan una implementación y cumplimiento de las normas y leyes mencionadas anteriormente para regular los parámetros del SPT y dar como resultado una buena práctica en el cálculo y diseño de un SPT.

Sin embargo en la elaboración de un proyecto de ingeniería es de vital importancia conocer los costos del mismo, por esto se propone, además de la

elaboración de una herramienta que facilite el estudio técnico, que ofrezca un análisis económico asociado a un presupuesto según las actividades a realizar y los materiales a utilizar en la construcción de un diseño del Sistema de Puesta a Tierra.

La finalidad del presente trabajo de grado es elaborar una herramienta que facilite los cálculos y el diseño de un SPT óptimo para cualquier área, realizando el análisis del suelo mediante el Modelo de suelo de dos capas.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Desarrollar una herramienta informática para el estudio técnico y económico de un Sistema de Puesta a Tierra (SPT) aplicando el modelo de dos capas.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar una investigación sobre los conceptos asociados y aplicados al diseño técnico de un Sistema de puesta a Tierra con el modelo de las dos capas.
- Diseñar el estudio técnico para un sistema de puesta a tierra teniendo en cuenta el modelo de dos capas para el análisis de medidas
- Complementar el Diseño de Estudio Técnico con un Diseño de Estudio Económico para conocer el costo de los materiales calculados en el ámbito técnico.
- Validar el Diseño Técnico del Aplicativo desarrollado.

### **1.3 LIMITACIONES Y ALCANCE**

Para este proyecto las limitaciones son principalmente de software, porque no se desarrollará un programa como tal. Se hará uso de un programa para crear una herramienta o aplicativo. La cantidad de software que se pueden usar para alcanzar el objetivo general se limita a dos: Microsoft Excel o MATLAB.

La herramienta a desarrollar contará con un estudio técnico, contará como modelo de análisis del suelo el de dos capas, considerando idóneo el método de medición de la resistividad del terreno de cuatro puntas o Método Wenner. Contando con un estudio económico para conocer los costos totales de la elaboración de un Sistema de Puesta a Tierra. Esta herramienta podrá ser utilizada para realizar un estudio, cálculo y diseño de Sistemas de Puesta a Tierra para Subestaciones Eléctricas de Alta y Extra Alta Tensión.

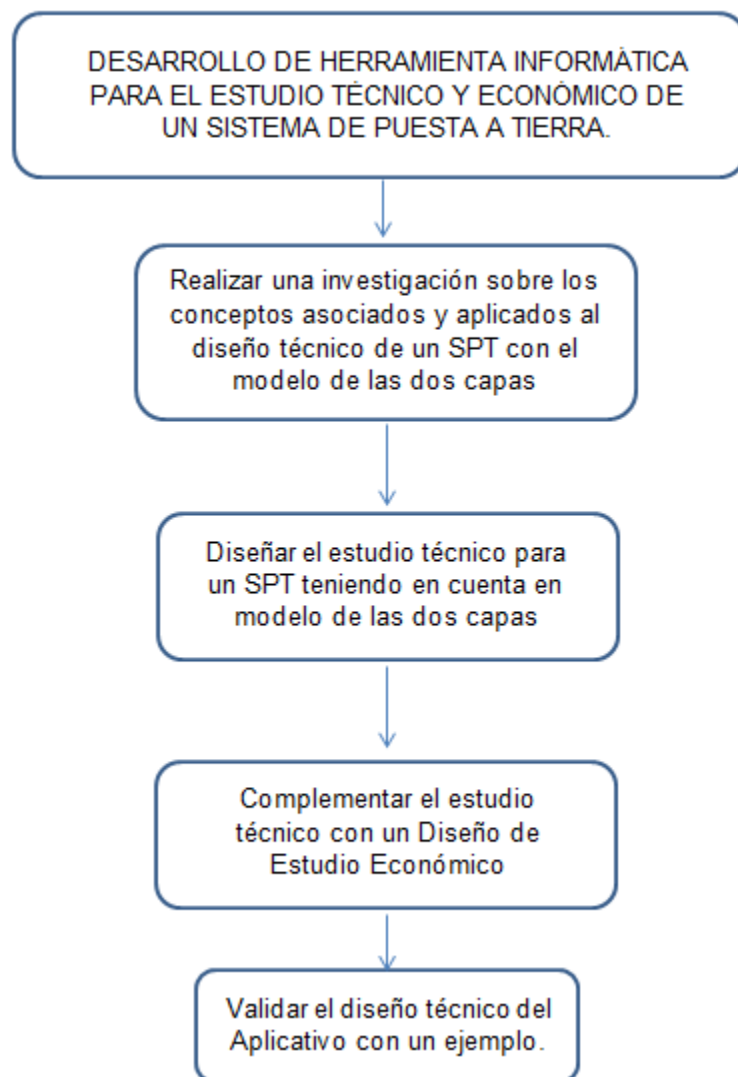
Los entregables de esta investigación son los siguientes ítems:

- Monografía.
- Herramienta desarrollada.
- Manual de uso del Aplicativo

## 1.4 PROCESO METODOLÓGICO

El procedimiento para la obtención de los objetivos propuestos, se puede resumir con el siguiente diagrama de procesos:

Ilustración 1. Proceso metodológico



Fuente: Troncoso (2014)

### 1.4.1 PLAN DE TRABAJO

Descripción de actividades a desarrollar para lograr los objetivos del proyecto.

1. Realizar una investigación sobre los conceptos asociados y aplicados al diseño técnico de un SPT con el modelo de las dos capas
  - a) Investigar los parámetros críticos que intervienen en el cálculo y diseño de un Sistema de Puesta a tierra.
  - b) Conocer los distintos métodos para la realización de mediciones de resistividad del suelo.
  - c) Aplicar correctamente las ecuaciones de los parámetros investigados para llevar a cabo un buen estudio.
2. Diseñar el estudio técnico para un SPT teniendo en cuenta en modelo de las dos capas.
  - a) Selección del programa herramienta
  - b) Definir los procesos a ejecutar para llevar a cabo el estudio técnico.
  - c) Definir parámetros de entrada y de salida.
  - d) Ejecución de la herramienta.
3. Diseñar el estudio técnico para un SPT teniendo en cuenta en modelo de las dos capas.

- a) Definir los procesos a ejecutar para llevar a cabo el diseño del estudio económico
  - b) Establecer la relación de los parámetros calculados en el Estudio Técnico con los datos de Estudio Económico.
4. Validar el Diseño Técnico del Aplicativo desarrollado.
- a) Tomar Ejemplo de libro guía.
  - b) Desarrollar paso a paso con el aplicativo para validar su funcionamiento.

## 1.5 ANTECEDENTES

La malla de tierra es “un sistema de electrodos de tierra horizontales que consiste en un número de conductores desnudos interconectados y enterrados en la tierra, proporcionando una tierra común para dispositivos eléctricos o estructuras metálicas, usualmente en un lugar específico” (IEEE Std 81-1983). La importancia de un SPT radica en las funciones que desempeña en el sistema eléctrico, entre las cuales se puede hacer mención:

- La protección de los individuos, limitando las tensiones de toque y paso a valores aceptables en las vecindades de la instalación durante condiciones de cortocircuito.
- Proteger la red contra los efectos de las descargas atmosféricas.
- Proporcionar un medio para disipar la corriente eléctrica en la tierra bajo condiciones normales o de cortocircuito, sin exceder ningún límite operacional de los equipos o afectar adversamente la continuidad del servicio.
- Mantener ciertos puntos de una red a un nivel de potencial definido con referencia a la tierra.

Entre las normas que proporcionan métodos y límites de diseño que se deben satisfacer y hasta explican cómo los Sistemas de Puesta a Tierra se pueden diseñar para ajustarse a ellos, encontramos en el ámbito internacional encontramos publicaciones técnicas por parte de la IEEE, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, asociación Técnico-Profesional dedicada a la estandarización; como:

- ANSI / IEEE Std 80 - Guide for Safety in AC Substation Grounding.



- ANSI / IEEE Std 81- Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.
- ANSI / IEEE Std 142 Recommended practice for grounding of Industrial and commercial power System.

Mientras tanto en Colombia la normativa para SPT se basa en:

- NTC 2050.
- RETIE, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.

Para el cálculo y diseño de un SPT se utilizan metodologías que primordialmente son mencionados en las normas IEEE Std 80, Guía para Seguridad en Aterramientos de Subestaciones AC y la IEEE Std 81, Guía para la medición de Resistencias de Tierra, Impedancias de Tierra y Potenciales de Superficie de Tierra en Sistemas de Aterramiento.

Para realizar un diseño óptimo para un SPT es necesario llevar a cabo mediciones de la resistividad del terreno en el cual se va a llevar a cabo su implementación. Entre las metodologías utilizadas para la medición de la resistividad del suelo, se mencionan las siguientes, según la IEEE Std 81:

- Método de medición de resistencia de una varilla (Variación con la profundidad o Método de tres puntos).
- Método de dos puntos.
- Método de cuatro puntos. Este último con dos variaciones de uso más frecuentes, El Método Wenner y el Método Schlumberger – Palmer.

La lucha por ser cada vez más competitivos ha provocado la creación de herramientas que faciliten los cálculos y diseños de SPT a tal punto que requiera menos esfuerzo y tiempo. Algunas de esas herramientas son programas que tienen como datos de entrada las características físicas del lugar y las medidas iniciales de resistividad del suelo. Entre los programas diseñados para ayudar en el cálculo de un SPT se pueden mencionar:

- IEB-MALLAS

Software desarrollado para diseñar mallas de puesta a tierra con el método de las dos capas, cumpliendo con los criterios establecidos en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) y la norma ANSI/IEEE Std. 80 "IEEE Guide for Safety in A.C. Substation Grounding".

- AutoGroundDesign

La herramienta de ingeniería AutoGroundDesign es el único software completamente automatizado que puede analizar y diseñar sistemas de puestas a tierra sin la intervención del usuario entre las varias fases del diseño.

- CYMGRD, Redes de tierra para subestaciones

## **2. ESTUDIO TÉCNICO (MARCO TEÓRICO)**

Para la realización de un buen Estudio técnico, la elaboración del presente proyecto se basará en las Normas Internacionales IEEE Std 80 y la IEEE 81. El Estudio técnico contempla todo el marco teórico para el análisis de los parámetros asociados en el cálculo y diseño de un Sistema de Puesta a Tierra.

### **2.1 CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UN SPT**

#### **2.1.1 Parámetros críticos**

Existen una serie de parámetros que dependen directamente del lugar donde se realizará el estudio y que indiscutiblemente tienen un impacto directo en los procedimientos de cálculos del Sistema de Puesta a Tierra (SPT). Como lo son: Corriente máxima a disipar por la malla ( $I_G$ ), Duración de falla ( $t_f$ ), Duración de choque ( $t_s$ ), Resistividad del suelo ( $\rho$ ), Resistividad de la capa superficial ( $\rho_s$ ) y Geometría de la malla.

##### **2.1.1.1 Corriente máxima a disipar por la malla**

Valor máximo de diseño de la corriente de falla a tierra,  $I_G$ .

$$I_G = Df \cdot I_g \quad (1)$$

Dónde:

$D_f$ : factor de decremento

$I_g$ : corriente simétrica de malla

Los parámetros que intervienen sobre el valor de corriente máxima a disipar por la malla ( $I_G$ ), son: Factor de decremento ( $D_f$ ), Corriente simétrica de malla ( $I_g$ ), Factor de división de corriente de falla ( $S_f$ ), Corriente simétrica de falla a tierra ( $I_f$ ), Corriente efectiva de falla asimétrica ( $I_F$ ) y el Factor de crecimiento.

#### **2.1.1.2 Factor de decremento, $D_f$ .**

Es un factor de ajuste usado en conjunto con la corriente inicial simétrica de falla a tierra en cálculos de diseño de malla de tierra tendientes a la seguridad. Permite obtener un valor eficaz equivalente de la onda de corriente asimétrica para una duración de falla dada  $t_f$ , teniendo en cuenta el efecto de desplazamiento de la corriente directa inicial y su atenuación durante la falla.

#### **2.1.1.3 Corriente simétrica de malla, $I_g$ .**

Es una porción de la corriente simétrica a tierra que circula entre la malla de tierra y la tierra circundante.

$$I_g = S_f \cdot I_f \quad (2)$$

Dónde:

$S_f$ : factor de división de corriente de falla

$I_f$ : corriente simétrica de falla a tierra

#### **2.1.1.4 Factor de división de corriente de falla, $S_f$ .**

Un factor que representa el inverso de un cociente de la corriente de falla simétrica a aquella parte de la corriente que fluye entre la rejilla puesta a tierra y la tierra circundante.

$$S_f = I_g / 3.I_0 \quad (3)$$

Dónde:

$I_g$ : corriente simétrica de malla

En la Norma IEEE Std 80 se encuentran los siguientes comentarios acerca del factor de división: “En realidad, el factor de división actual podría cambiar durante la duración de la avería, basado en las tasas de decaimiento distintos de las contribuciones de la culpa y la secuencia de interrumpir las operaciones del dispositivo. Sin embargo, para los efectos de calcular el valor de diseño de máxima corriente y simétrico rejilla actual por las definiciones de simétrica actual y máxima rejilla actual, la relación se asume constante durante toda la duración de una falla dada”.

### 2.1.1.5 Corriente simétrica de falla a tierra, $I_f$ .

Es el valor máximo eficaz de corriente de falla simétrica después del momento de iniciación de falla a tierra. Como tal, representa el valor RMS del componente simétrico en la primera mitad de ciclo de una onda de corriente que se desarrolla después del instante de la falla a tiempo cero. Para fallas fase-tierra. Viene dada por:

$$I_{f(0+)} = 3 I_0 \quad (4)$$

Dónde:

$I_{f(0+)}$ : corriente RMS simétrica inicial de falla a tierra

$I_0$ : valor RMS de corriente simétrica de secuencia cero que se desarrolla

Inmediatamente después del momento de la iniciación de la culpa, reflejando las reactancias subtransitorias de máquinas rotativas contribuye a la falla.

Para efectos de la IEEE 80, esta corriente simétrica RMS de falla se muestra en una notación abreviada como  $I_f$  o se conoce solo como  $3I_0$ . La razón subyacente para la notación de esta última es que, para los propósitos de esta guía, la corriente de falla simétrico inicial se supone que permanecen constantes durante todo el tiempo de la falla.

De tal manera que basando esta investigación en la Norma IEEE 80, se hará uso de esta abreviación para el caso de  $I_f$ :  $3I_0$ .

#### 2.1.1.6 Corriente efectiva de falla asimétrica, $I_F$ .

El valor RMS de la onda de corriente asimétrica, integrado en el intervalo de duración de la avería.

$$I_F = D_f \cdot I_f \quad (5)$$

Dónde:

$I_f$ : Corriente simétrica de falla a tierra, A.

$D_f$ : factor de decremento

#### 2.1.1.7 Factor de crecimiento

Representa la consideración de aumentos futuros de cargas o de alimentadores. Si se construye la malla de puesta a tierra teniendo en cuenta solo la capacidad total de la subestación,  $C_p = 1$ .

Al integrarlo en la fórmula de corriente máxima a disipar por la malla, tenemos:

$$I_G = D_f \cdot I_g \cdot C_p \quad (6)$$

#### **2.1.1.8 Duración de falla ( $t_f$ ) y Duración de choque ( $t_s$ )**

La duración de la falla y la duración del choque normalmente se asumen iguales, a menos que la duración de la falla sea la suma de choques sucesivos, como los producidos por los recierres automáticos de los reclosers.

Asumir los valores de  $t_f$  igual al tiempo normal de interrupción de la falla, es decir, la suma de tiempos de respuesta de los relés principales y el tiempo del interruptor, y de  $t_s$  iguales al tiempo máximo de duración de la falla, es decir, relés de respaldo más tiempo de interruptores de respaldo, daría como resultado un diseño más conservador, por obtener la mayor corriente de falla y el mayor tamaño del conductor.

#### **2.1.1.9 Resistividad del suelo, $\rho$ .**

Es considerado como un parámetro crítico debido a la gran variabilidad a la que está sometido por la no uniformidad del suelo, aunque lo parezca a simple vista; ocasiona variaciones tanto horizontales como verticales, haciendo importante recopilar la suficiente cantidad de datos a través de mediciones del terreno a distintas profundidades.



Tabla 1. Rango de resistividad del suelo.

TIPO DE SUELO	RANGO DE RESISTIVIDAD ( $\Omega$ -m)
Lama	5 – 100
Humus	10 – 150
Limo	20 – 100
Arcillas	80 – 330
Tierra de jardín	140 – 480
Caliza fizurada	500 – 1000
Caliza compacta	1000 – 5000
Granito	1500 – 10000
Arena común	3000 – 9000
Basalto	10000 – 20000

Fuente: Ramírez Carlos Felipe (1991). Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión. 2 Ed.

#### 2.1.1.10 Resistividad de la capa superficial, $\rho_s$ .

Agregar una capa de material superficial ayuda en la limitación de la corriente del cuerpo mediante la adición de resistencia a la resistencia equivalente del cuerpo. “La capa superficial de espesor ( $h_s$ ) entre  $0.08 \text{ m} \leq h_s \leq 0.15 \text{ m}$ , de material de alta resistencia, tal como la grava, aumenta la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las personas”.

Otra utilidad de la capa superficial es que retarda la evaporación de la humedad limitando el secado de la capa superior durante el periodo de verano. “Esta capa tiene una resistividad del orden de  $5000 \Omega \cdot \text{m} > \rho_s > 2000 \Omega \cdot \text{m}$ . Una capa con un espesor entre  $0.1 \text{ m}$  y  $0.15 \text{ m}$ , disminuye el factor de riesgo

(relación entre la corriente del cuerpo y la corriente de cortocircuito) a una relación 10:1 comparado con la humedad natural de la tierra”.

Se incluye entonces el factor de disminución de la capa superficial ( $C_s$ ), que puede llegar a considerarse como un factor de corrección para el cálculo de la resistencia efectiva del pie de una persona en presencia de un material superficial de espesor finito. La IEEE Std 80 presenta una expresión empírica, afirmando que los valores obtenidos a través de esta están dentro del 5 % de los valores obtenidos con el método analítico.

La ecuación expuesta en la IEEE Std 80, es:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0.09} \quad (7)$$

Dónde:

$C_s$ : Factor de disminución de la capa superficial.

$\rho$ : Resistividad del terreno,  $\Omega \cdot m$ .

$\rho_s$ : Resistividad de la capa superficial,  $\Omega \cdot m$ .

$h_s$ : Espesor de la capa superficial, m.

Mientras que el factor de reflexión entre las resistividades de materiales diferentes se define como:

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (8)$$

#### **2.1.1.11 Geometría de la malla**

En general, al mencionar la geometría de la malla como parámetro crítico, se habla de la limitación que se basa en la economía y las limitaciones físicas de la instalación de la rejilla. La limitación económica es evidente y las físicas definen como primera medida el tamaño de la malla.

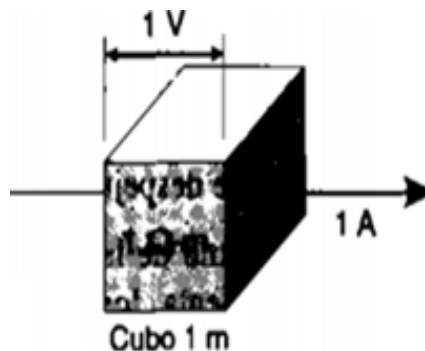
### **2.2 EL SUELO Y SU RESISTIVIDAD**

De los parámetros anteriores considerados como críticos, la *Resistividad del suelo* representa mayores repercusiones sobre los cálculos de un buen sistema de puesta a tierra. Esto debido a la importancia que tiene el análisis de los factores que afectan directamente las mediciones que se llevan a cabo como parte esencial para lograr los cálculos de un sistema de puesta a tierra.

#### **2.2.1 RESISTIVIDAD DEL SUELO**

Se conoce a la resistividad como la característica de los materiales que mide su oposición al flujo de la corriente eléctrica. De Ramírez, Carlos Felipe (1991). Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión. 2 Ed., se encuentra que: “La resistividad se define como la tensión medida en los extremos de un cubo de 1 m (V/m) dividido por la corriente que atraviesa una sección cuadrada de un cubo de 1 m ( $I/m^2$ ); por lo tanto, el resultado es en unidades de  $\Omega.m$ ”.

## Ilustración 2. Definición de Resistividad



Fuente: Ramírez, Carlos Felipe (1991). Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión. 2 Ed.

El suelo es considerado como un mal conductor si llegamos a compararlo con materiales conductores, comparando los datos de la Tabla 1, Rango de resistividad del suelo, anteriormente expuesta, con los datos en la Tabla 2 que se apreciará a continuación:

Tabla 2. Resistividad de diferentes conductores

Tipo de conductor	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )
Cobre puro	$1,6 \times 10^{-8}$
Aluminio	$2,7 \times 10^{-8}$
Acero inoxidable	$72 \times 10^{-6}$
Suelos más comunes	1 a 10 000

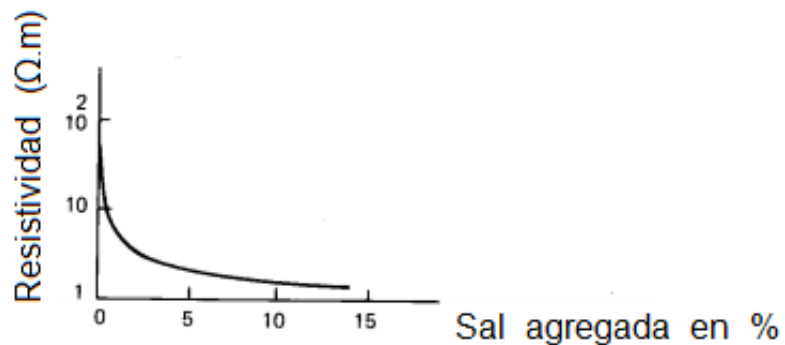
Fuente: Ramírez, Carlos Felipe (1991). Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión. 2 Ed.

Sin embargo la resistividad del suelo es determinada por varios factores, los cuales varían de un lugar a otro, y hasta en un mismo terreno ya que se pueden presentar también distintos valores de resistividad a pesar de ser muy cercano. La resistividad de la tierra varía con factores como: el tipo de suelo, la temperatura, humedad, contenido de sal y su concentración.

### 2.2.1.1 Minerales y sales disueltos.

La presencia de sales y minerales en el terreno afecta directamente su resistividad, permitiendo una mejor conducción de electricidad por el suelo.

Ilustración 3. Variación de la Resistividad del terreno con sales disueltas

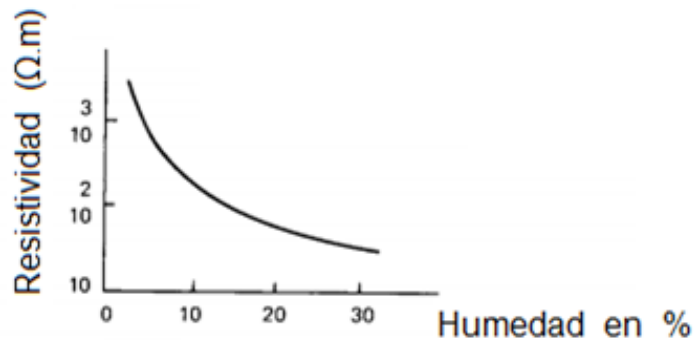


Fuente: Norma IEEE Std 81 (1983)

### 2.2.1.2 La humedad

EL factor humedad afecta inversamente la resistividad del suelo. En suelos secos la resistividad presenta altos valores de resistividad, mientras que los suelos húmedos presentan una menor resistividad.

Ilustración 4. Variación de la Resistividad del terreno con la humedad



Fuente: Norma IEEE Std 81 (1983)

En general se presenta un aumento de la humedad conforme aumenta la profundidad. Pero complementando con la Figura 2, ante la presencia de bajo contenido de sal disuelta en el agua, entonces una alta humedad no siempre significa una baja resistencia.

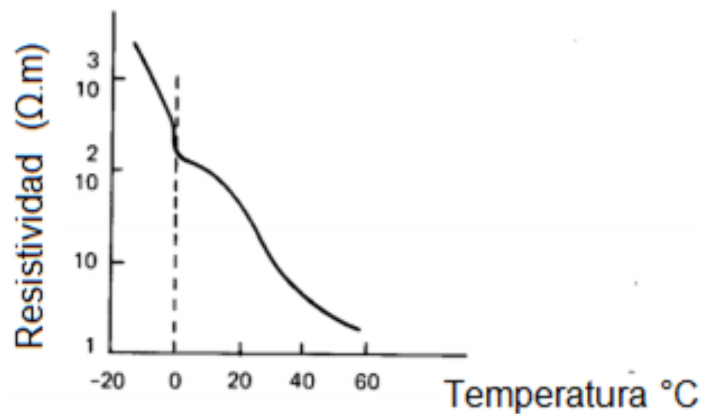
### 2.2.1.3 Temperatura

Para los efectos de la temperatura, la IEEE Std 80 resume el comportamiento de la resistividad, de la siguiente manera: “La resistividad de la tierra aumenta lentamente con la disminución de las temperaturas desde 25 °C a 0 °C. Por debajo de 0 °C la resistividad aumenta rápidamente. En el suelo congelado, como en la capa superficial en invierno la resistividad puede ser excepcionalmente alta”.

El factor temperatura posee una influencia crucial sobre la resistividad del terreno, ya que puede llegar a afectar de dos maneras:

- Un aumento en la temperatura, la humedad del suelo disminuye y se presenta un aumento de la resistividad; aunque puede ser considerado como algo que afecte solo la superficie del suelo.
- Mientras que la disminución de la temperatura hasta valores iguales o por debajo a cero, logra un incremento considerable en el valor de la resistencia. La explicación de esto es que el agua contenida en el suelo se congela y el hielo es un mal conductor.

Ilustración 5. Variación de la Resistividad del terreno con la temperatura



Fuente: Norma IEEE Std 81 (1983)

Tabla 3. Formación y Periodo geológico. Algunos valores de resistividad para diferentes rocas.

Earth Resistivity Ohmmeters	Quaternary	Cretaceous Tertiary Quaternary	Carboniferous Triassic	Cambrian Ordovician Devonian	Pre-Cambrian and Combinat. with Cambrian
1 Sea water					
10 Unusually low		Loam Clay Chalk	Chalk		
30 Very low			Trap Diabase Shale		
100 Low			Limestone	Shale	
300 Medium			Sandstone	Limestone	
1000 High				Sandstone	Sandstone
3000 Very High				Dolomite	Quartzite
10 000 Unusually high					Slate
					Granite
					Gneisses

Fuente: Norma IEEE Std 81 (1983)

#### 2.2.1.4 Composición del terreno

La composición del terreno es sin duda otro factor que influye directamente en la resistividad del terreno, debido a que las diferentes clases de terreno no están delimitadas como para afirmar un valor de resistividad en el punto elegido para realizar la puesta a tierra.



Lo motivos expuestos hacen necesaria la medición de la resistividad del suelo por motivos de la estratificación del mismo, en ocasiones con capas superpuestas de características conductivas distintas.

### **2.2.2 MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO**

Debido a los factores que afectan el suelo y su resistividad las estimaciones basadas en la clasificación del suelo permite realzar solo aproximaciones de la resistividad. Por lo tanto, la medición de la resistividad del suelo se hace obligatoria.

Las mediciones deben realizarse en muchos lugares dentro del área de instalación porque rara vez se encontrarán lugares donde la resistividad del terreno es uniforme a una profundidad considerable. La presencia de varias capas en el terreno, por muy homogéneo que parezca a simple vista, presenta valores diferentes de resistividad en cada una. A menudo, también se producen cambios laterales, pero en comparación con los verticales, estos cambios son generalmente más graduales. Sin embargo las pruebas o mediciones de resistividad del suelo se realizan para determinar la variación de la resistividad con respecto a la profundidad.

Las técnicas de medición de resistividad se encuentran descritas en la IEEE Std 81 – 1983, las cuales serán mencionadas y explicadas a continuación para conocer sus puntos fuertes y la manera correcta como deben realizarse.

### 2.2.2.1 Variación del método de profundidad (Variation of Depth Method)

Este método, a veces se llama método de tres puntos según la norma IEEE Std 80. Consiste en medir la resistencia a tierra de un electrodo tipo varilla y, basados en la ecuación de resistencia a tierra de un electrodo vertical en un suelo homogéneo y en los datos geométricos del electrodo, derivar la resistencia del suelo.

Considerando que el terreno es homogéneo:

$$\rho = \frac{2\pi LR}{\ln\left(\frac{4L}{\alpha}\right) - 1} \quad (9)$$

Dónde:

$\rho$  = Resistividad del terreno

$L$  = longitud del electrodo

$\alpha$  = radio del electrodo

$R$  = valor de resistencia leído por el equipo.

El procedimiento comúnmente aplicado es el de disponer de un electrodo tipo varilla con marcaciones cada 20 o 30 cm, y cuya longitud debe ser la suficiente como para obtener la mayor información posible de cómo varia la resistencia de ida a medida que penetra el electrodo en la tierra (lo que originó el nombre de método de la variación de profundidad). Es decir, por cada marca se lee un

valor de resistencia de puesta a tierra y con la formula anterior se calcula la resistividad del terreno en las vecindades del electrodo.

La norma IEEE Std 81-1983 dice, “La variación del método de profundidad da información útil sobre la naturaleza del suelo en las cercanías de la varilla (5 a 10 veces la longitud de la barra). Si un gran volumen de suelo debe ser investigado, es preferible utilizar el método de cuatro puntos, ya que la conducción de las barras largas no es práctica”.

#### **2.2.2.2 Método de dos puntos**

Las mediciones aproximadas de la resistividad de tierra no alterada pueden hacerse en el campo con el medidor de resistividad del suelo shepard y métodos similares de dos puntos. El aparato consiste en un pequeño electrodo de hierro y electrodo de hierro más pequeño, ambos atados a una barra aislante. El terminal positivo de una batería está conectado a través de un miliamperímetro al electrodo más pequeño y el terminal negativo al otro electrodo. El instrumento puede ser calibrado para leer directamente en ohm-centímetros a la tensión nominal de la batería. Este tipo de aparatos es fácilmente portable y con ello una serie de medidas puede hacerse en un corto plazo en pequeños volúmenes de suelo clavando los electrodos en el suelo o en las paredes o el fondo de las excavaciones.

#### **2.2.2.3 Método de Cuatro puntos**

El método más exacto en la práctica para realizar la medición de la resistividad media de los volúmenes grandes de tierra es el método de cuatro puntos. Este método consiste en pequeños electrodos enterrados en cuatro pequeños

agujeros en la tierra, todos a una profundidad  $b$  y espaciados (en línea recta) en intervalos  $a$ . Luego una corriente de prueba  $I$  es pasada entre los dos electrodos externos y el potencial  $V$  entre los dos electrodos internos es medido con un potenciómetro o con un voltímetro de alta impedancia. Entonces  $V/I$  da la resistencia  $R$  ohmios.

Hay dos variaciones diferentes del método de cuatro puntos que son usadas a menudo:

#### *Arreglo Igualmente Espaciado o Wenner*

Con este arreglo los electrodos están igualmente separados. Dejando una distancia “ $a$ ” entre dos electrodos adyacentes. Entonces, la resistividad - en los términos de las unidades de longitud en la cual “ $a$ ” y “ $b$ ” se miden - es:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (10)$$

Dónde:

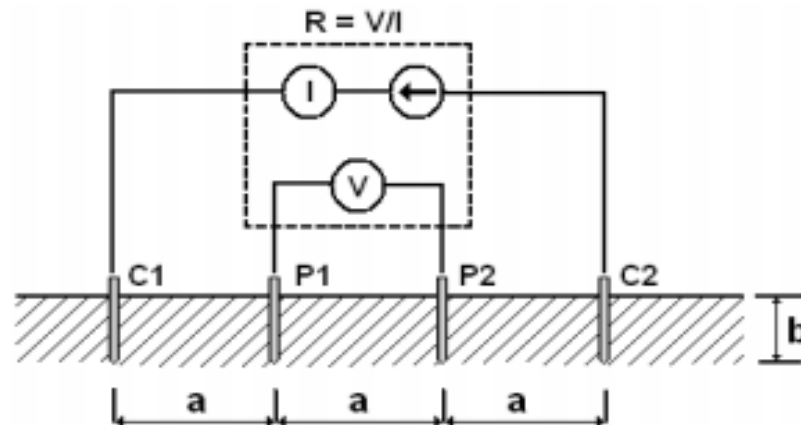
$\rho$ : Resistividad del terreno ( $\Omega \cdot m$ )

$R$ : Resistencia resultante de la medida,  $\Omega$ .

$a$ : Distancia entre electrodos adyacentes, m.

$b$ : profundidad de enterramiento del electrodos, m.

Ilustración 6. Método de cuatro puntos igualmente espaciados o Wenner



### Método de Wenner

Fuente: Mejía, Wilson A (2011). Diseño de la malla de Puesta a Tierra para la Subestación tipo interior de 225 KVA, en las instalaciones de la Escuela Superior de Administración Pública ESAP, Localizadas en la Ciudad de Bogotá.

Toca resaltar que esto no se aplica a las barras de tierra conducidas a profundidad “b”; se aplica sólo a pequeños electrodos enterrados a profundidad “b”, con alambres de conexión aislados. Sin embargo, en la práctica, cuatro barras generalmente se colocan en una línea recta a intervalos “a”, a una profundidad no superior a 0,1 “a”. Entonces suponemos que  $b = 0$  y la fórmula se convierte:

$$\rho = 2\pi a R \quad (11)$$

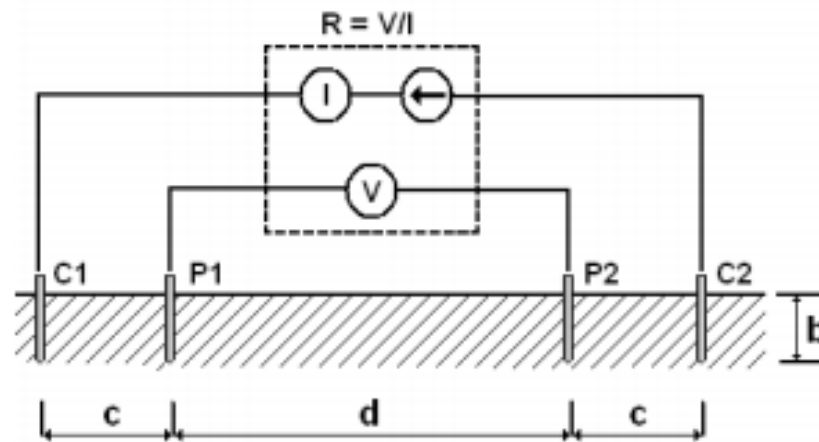
Y da aproximadamente la resistividad promedio del suelo a la profundidad “a”.

*Desigualmente espaciados o arreglo Schlumberger-Palmer.*

Una deficiencia del método Wenner es la rápida disminución de la magnitud del potencial entre los dos electrodos internos cuando se incrementa su espaciamiento a valores relativamente grandes. A menudo los instrumentos

comerciales son insuficientes para medir tales valores bajos de potencia. Con el fin de poder medir resistencias con grandes distancias entre los electrodos actuales, este arreglo puede utilizarse con éxito. Las sondas de potencial son traídas más cerca a los correspondientes electrodos de corriente. Esto aumenta el potencial valor medido.

Ilustración 7. Método de cuatro puntos. Schlumberger-Palmer



### Método de Schlumberger-Palmer

Fuente: Mejía, Wilson A (2011). Diseño de la malla de Puesta a Tierra para la Subestación tipo interior de 225 KVA, en las instalaciones de la Escuela Superior de Administración Pública ESAP, Localizadas en la Ciudad de Bogotá.

La fórmula que se utilizará en este caso puede ser fácilmente determinada. Si la profundidad de enterramiento de los electrodos  $b$  es pequeña en comparación con su separación  $d$  y  $c$ , entonces la resistencia medida puede calcularse como sigue:

$$\rho = \frac{\pi c(c + d)R}{d} \quad (12)$$

Dónde:

$\rho$ : resistividad del terreno ( $\Omega \cdot m$ )

$R$ : resistencia resultante de la medida,  $\Omega$ .

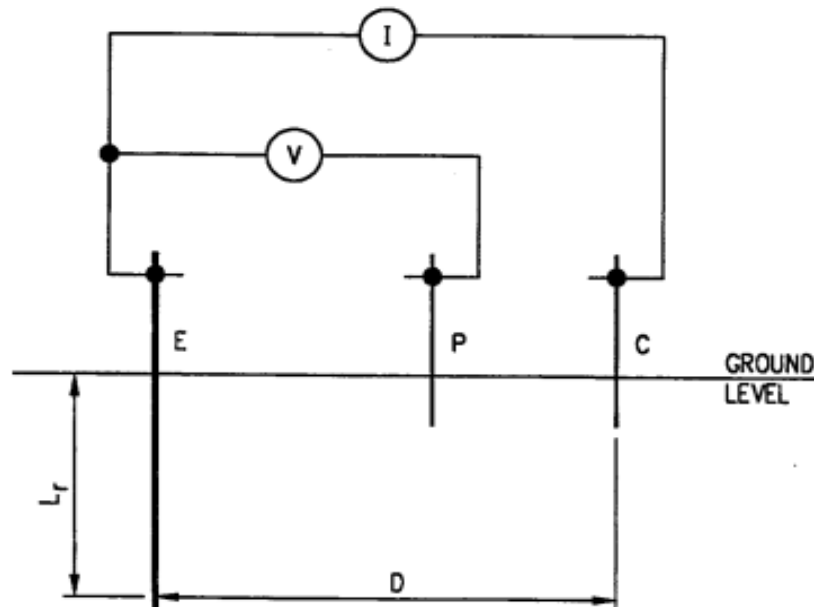
$c$ : distancia entre electrodos exteriores y el adyacente, m.

$d$ : distancia entre electrodos interiores, m.

### ***Método de Caída de Potencial***

Otro método para realizar la medición y que se encuentra descrito en la Norma IEEE 81 – 1983, es el Método de Caída de Potencial.

Ilustración 8. Método caída de potencial



Fuente: Norma IEEE Std 81 (1983)

En este método se varía la profundidad  $L_r$  del electrodo de prueba,  $E$ . Las otras dos varillas, conocidas como las barras de referencia son llevadas a una profundidad en línea recta. La localización de la varilla de voltaje,  $P$ , entre la varilla de prueba y la varilla de corriente,  $C$ . Alternativamente, puede colocarse al lado opuesto de la barra de corriente. La resistividad aparente ( $\rho_a$ ) está dada por:

$$\rho_a = \frac{2\pi \cdot L_r \cdot R}{\ln\left(\frac{8L_r}{d}\right) - 1} \quad (13)$$

Dónde:

$L_r$ : Longitud de la varilla, m.

$d$ : Diámetro de la varilla, m.

#### **2.2.2.4 Tratamiento para disminuir la resistividad del terreno**

Regularmente, es imposible llegar a la reducción deseada en la resistencia de la tierra agregando más conductores o varillas de tierra a la malla. Una solución alternativa es incrementar de manera efectiva el diámetro de los electrodos, modificando el suelo que rodea al electrodo. Las actividades que se realizan con este fin que son mencionadas en la IEEE 80 son las siguientes:

- a) Uso de cloruro de sodio, magnesio y sulfatos de cobre o cloruro de calcio, para aumentar la conductividad del suelo inmediatamente alrededor de un electrodo. Pero estas sales emigran a otras áreas.



- b) Uso de la bentonita, una arcilla natural que contiene el mineral montmorillonita, que se formó por acción volcánica. No es corrosivo, es estable, y tiene una resistencia de  $2,5 \Omega.m$  a una humedad del 300 %.
- c) El uso de electrodos de tipo químico que constan de un tubo de cobre relleno de sal. Los agujeros en el tubo permiten la entrada de agua, disolver las sales y permitir que la solución de sal se filtre en la tierra.
- d) Materiales artificiales de tierra, algunos de ellos con una resistencia de menos de  $0,12 \Omega.m$ , normalmente colocados alrededor de la varilla o de los conductores de puesta a tierra en una fosa. En Colombia se conocen como Hidrosolta y Fabigel.

### **2.2.3 INTERPRETACIÓN DE MEDIDAS DE RESISTIVIDAD**

La interpretación de los resultados obtenidos en el campo es quizás la parte más difícil del programa de medición. Pero también la parte más importante para lograr un análisis completo de la variación de la resistividad de tierra, que en ocasiones es grande y compleja debido a la heterogeneidad de la tierra. Excepto en muy pocos casos es esencial para establecer un simple equivalente a la estructura de la tierra.

Los modelos de suelo más comúnmente usados para la resistividad son:

#### **2.2.3.1 Modelo de suelo uniforme**

Cuando la diferencia entre las mediciones de la resistividad de las capas es moderada, se puede utilizar un valor promedio para la resistividad del suelo. La resistividad aproximada para un suelo uniforme se puede obtener tomando un

promedio aritmético de las resistividades aparentes medidas en varios sitios con la ecuación:

$$\rho_{a\ prom} = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}}{n} \quad (14)$$

Dónde:

$\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}$ : Resistividad aparente medido en diferentes espaciamientos en el método de cuatro puntos o a diferentes profundidades en el método de varilla de tierra conducido en  $\Omega.m$

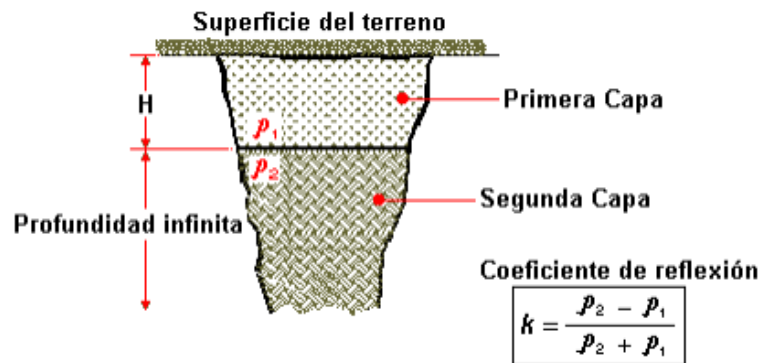
$n$ : Número total de medidas tomadas

Pero la mayoría de los suelos no reúnen este criterio, ya que en la práctica la resistividad de los suelos varía significativamente. En lugar del promedio aritmético, también puede emplearse la distribución normal para obtener la resistividad aparente del suelo. En el Libro de “Ramírez, Carlos Felipe (1991). Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión. 2 Ed.” Establece que “Como guía general, un suelo puede ser considerado como uniforme si la diferencia entre los dos valores extremos de las resistividades medidas es menor del 30 %”.

#### **2.2.3.2 Modelo de suelo de dos capas**

Por lo general un modelo de suelo de dos capas suele representarse por una capa superior de profundidad finita, por encima de una capa inferior de profundidad infinita.

Ilustración 9. Terreno de dos capas



Fuente: Mejía, Wilson A (2011). Diseño de la malla de Puesta a Tierra para la Subestación tipo interior de 225 KVA, en las instalaciones de la Escuela Superior de Administración Pública ESAP, Localizadas en la Ciudad de Bogotá.

El cambio abrupto de la resistividad en las proximidades de cada capa del suelo puede describirse por medio del factor de reflexión  $K$ , definido en la ilustración, y en el presente documento con la Ecuación (8).

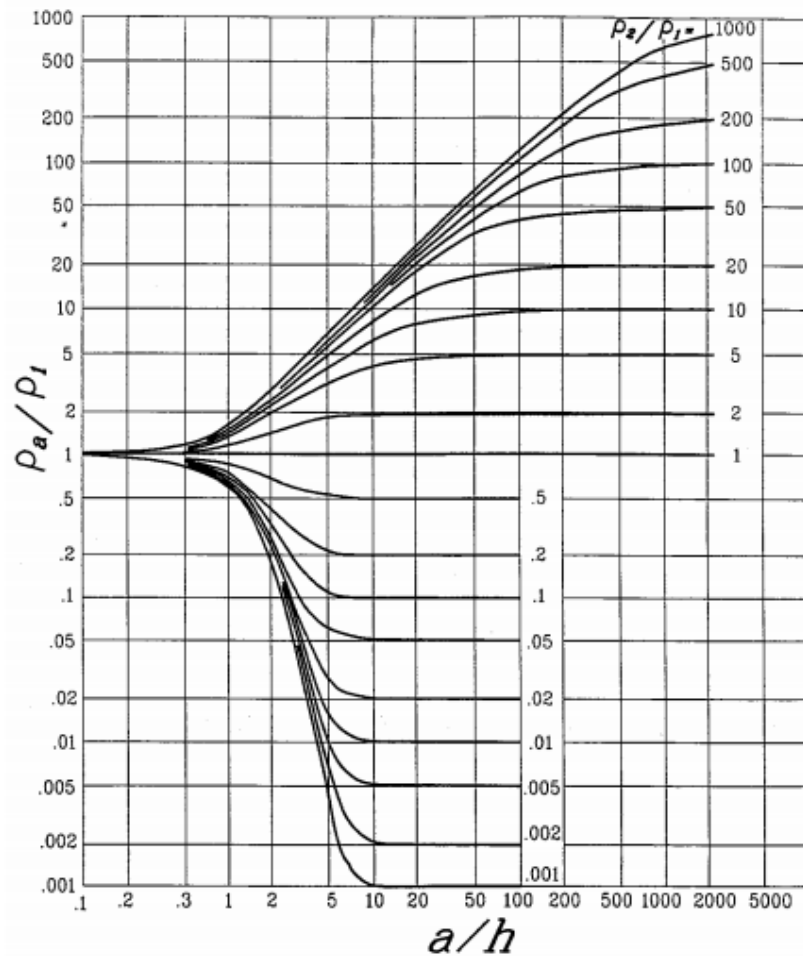
Dónde

$\rho_1$ : Resistividad de la capa superior,  $\Omega.m$ .

$\rho_2$ : Resistividad de la capa inferior,  $\Omega.m$ .

Un modelo de suelo de dos capas puede aproximarse empleando el método gráfico de Sunde presente en la IEEE Std 80 – 2000.

Ilustración 10. Método Gráfico de Sunde



Fuente: Norma IEEE Std 80 (2000)

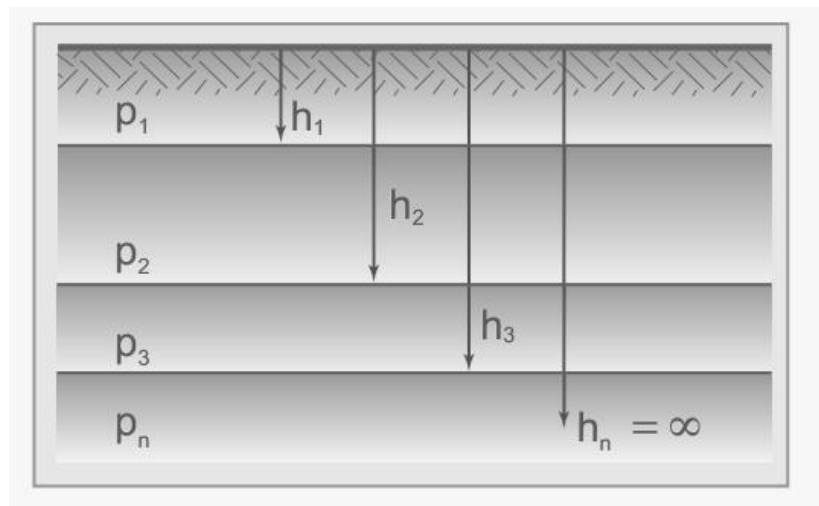
Los parámetros  $\rho_1$  y  $\rho_2$  se obtienen por inspección de las medidas de resistividad. Solamente  $h$  (profundidad de la capa superior) es obtenido por el método de Sunde, como sigue:

- Dibujar el gráfico  $\rho_a$  (Resistividad aparente) vs.  $a$  (espaciamiento).
- El  $\rho_a$  correspondiente al espaciamiento menor es  $\rho_1$  y al mayor es  $\rho_2$ .
- Determinar  $\rho_2/\rho_1$  y seleccionar una curva en el gráfico de Sunde, que coincida estrechamente, o interpolar y trazar una nueva curva en el gráfico.

- d) Seleccione en el eje Y el valor de  $\rho_a/\rho_1$  dentro de la región pendiente de la curva  $\rho_2/\rho_1$  apropiada de la gráfica de Sunde.
- e) Lea el valor correspondiente de  $a/h$  en el eje X.
- f) Calcular  $\rho_a$  multiplicando el valor seleccionado  $\rho_a/\rho_1$ , en el paso d) para  $\rho_1$ .
- g) Leer el espaciamiento de prueba correspondiente de la gráfica de realizada en a).
- h) Calcular  $h$ , profundidad del nivel superior, usando la separación apropiada  $a$ .

### 2.2.3.3 Modelo de suelo multicapas

Ilustración 11. Suelo multicapa.



Fuente: Morales, Nelson (1999). Mallas de Tierra.

La norma IEEE Std 80 establece que, "Para el caso de encontrar suelos con condiciones altamente no uniformes, se requiere el uso de técnicas de modelamiento multicapas, cuando un modelo de suelo de dos capas no es

factible. Un modelo multicapa puede incluir varias capas horizontales o varias capas verticales. Las técnicas para interpretar resistividades de suelo altamente no uniforme requieren el uso del método de los elementos finitos, considerando las características anisotrópicas del tensor de conductividad, para la solución de la ecuación”.

## 2.3 CALIBRE DEL CONDUCTOR

### 2.3.1 Cálculo del calibre del conductor

La elevación de temperatura de corto tiempo en un conductor de tierra, o el tamaño requerido del conductor como una función de la corriente de falla que pasa por el conductor, se encuentra mediante las ecuaciones:

Para cálculo en kcmil:

$$A_{kcmil} = I \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (15)$$

Para el cálculo del conductor en mm<sup>2</sup>:

$$A_{mm^2} = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (16)$$

Dónde:

*I*: es la corriente RMS, KA

$T_m$ : es la máxima temperatura permisible, °C

$T_a$ : es la temperatura ambiente, °C

$T_r$ : es la temperatura de referencia para las constantes materiales, °C

$\alpha_0$ : es el coeficiente térmico de la resistividad a 0 °C, 1/°C

$\alpha_r$ : coeficiente térmico de la resistividad a temperatura de referencia  $T_r$ , 1/°C

$\rho_r$ : resistividad del conductor de tierra a temperatura de referencia  $T_r$ ,  $\mu\Omega\text{-cm}$

$K_0$ :  $1/\alpha_0$  ó  $(1/\alpha_r) - T_r$ , °C

$T_c$ : duración de la corriente, s

$TCAP$ : capacidad térmica por unidad de volumen, Tabla,  $\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$

Tabla 4. Constante de materiales.

Descripción	Conductividad del material (%)	Factor $\alpha_r$ a 20 °C (1/°C)	$K_0$ a 0 °C (0 °C)	Temperatura de fusión * $T_m$ (°C)	$\rho_r$ 20 °C ( $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ )	TCAP capacidad térmica [ $\text{J}/(\text{cm}^3\cdot^\circ\text{C})$ ]
Cobre recocido	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Cobre estirado en frío	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Acero revestido de cobre	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Acero revestido de cobre	30.0	0.00378	245	1084	5.86	3.85
Acero revestido de cobre. <sup>b</sup>	20.0	0.00378	245	1084	8.62	3.85
Aluminio, EC	61.0	0.00403	228	657	2.86	2.56
Aluminio, aleación 5005	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.60
Aluminio aleación 6201	52.5	0.00347	268	654	3.28	2.60
Acero revestido de aluminio	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.58
Acero, 1020	10.8	0.00160	605	1510	15.90	3.28
Acero inoxidable revestido. <sup>c</sup>	9.8	0.00160	605	1400	17.50	4.44
Acero galvanizado	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.93
Acero inoxidable 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.03

a. De normas ASTM.

b. Varillas de acero revestido de cobre basados en cobre 0.254 mm de espesor (0.010 pulg)

c. Varilla de acero inoxidable revestido en 0.508 mm base No. 304 acero inoxidable grueso sobre núcleo de acero No. 1020.

Fuente: Norma IEEE Std 80 (2000)



### Fórmula simplificada

La IEEE Std 80 – 2000 ofrecen en unidades inglesas una simplificación de la fórmula anterior, quedando como sigue a continuación:

$$A_{kcmil} = I \cdot K_f \cdot \sqrt{ts} \quad (17)$$

Dónde:

$K_f$ : Constante del material conductor a diversos valores de  $T_m$  (Temperatura de fusión), utilizando la temperatura ambiente ( $T_a$ ) de 40 °C.

Tabla 5, Constante  $K_f$  de materiales conductores

Material	Conductivity (%)	$T_m^a$ (°C)	$K_f$
Copper, annealed soft-drawn	100.0	1083	7.00
Copper, commercial hard-drawn	97.0	1084	7.06
Copper, commercial hard-drawn	97.0	250	11.78
Copper-clad steel wire	40.0	1084	10.45
Copper-clad steel wire	30.0	1084	12.06
Copper-clad steel rod	20.0	1084	14.64
Aluminum EC Grade	61.0	657	12.12
Aluminum 5005 Alloy	53.5	652	12.41
Aluminum 6201 Alloy	52.5	654	12.47
Aluminum-clad steel wire	20.3	657	17.20
Steel 1020	10.8	1510	15.95
Stainless clad steel rod	9.8	1400	14.72
Zinc-coated steel rod	8.6	419	28.96
Stainless steel 304	2.4	1400	30.05

Fuente: Norma IEEE Std 80 (2000)

Tabla 6. Secciones de los conductores típicos de puesta a tierra.

Calibre del cable, AWG	Sección nominal, mm <sup>2</sup>
# 2	33.63
# 1	42.41
1/0	53.48
2/0	67.42
3/0	85.03
4/0	107.20
250 kcmil	126.65
350kcmil	177.36
500 kcmil	253.40

Fuente: Troncoso (2014) De Norma IEEE Std 80 (2000)

### 2.3.2 Selección del Tipo de conductor

Las consideraciones a continuación han sido extraídas de la IEEE Std 80 para realizar una buena selección del conductor a utilizar para la puesta a tierra. Las cuales son:

Cada elemento del sistema de puesta a tierra, incluyendo los conductores de la red, conexiones, cables de conexión y todos los electrodos primarios, debe estar diseñado para que la vida útil esperada del diseño de la instalación, el elemento debe:

- a) Tener conductividad suficiente de modo que no va a contribuir sustancialmente a diferencias de voltaje local.
- b) Resistir el deterioro mecánico y fusión bajo la combinación más adversa de una falla en magnitud y duración.

- c) Ser mecánicamente fiable y resistente a un alto grado.
- d) Ser capaz de mantener su función incluso cuando está expuesto a corrosión o maltrato físico.

Entre los materiales más utilizados para realizar las puestas a tierra, la IEEE Std 80 hace mención de: el cobre, acero revestido de cobre, aluminio y el acero.

**Cobre.** El cobre es un material común utilizado para la conexión a tierra. Los conductores de cobre, además de su alta conductividad, tienen la ventaja de ser más resistentes a la corrosión subterránea porque el cobre es catódico con respecto a la mayoría de los otros metales que son susceptibles de ser enterrado en las cercanías.

**Acero revestido de cobre.** Se utiliza generalmente para las barras subterráneas y ocasionalmente para rejillas, especialmente donde el robo es un problema de conexión a tierra. El uso de cobre o de un acero revestido de cobre en menor grado, por lo tanto asegura que se mantendrá durante años, siempre y cuando los conductores sean de un tamaño adecuado y la integridad de una red subterránea y las condiciones del suelo no son corrosivas para el material utilizado.

**Aluminio.** El aluminio se utiliza para las rejillas de suelo con menos frecuencia. Aunque a primera vista el uso de aluminio sería una elección natural para el equipo de GIS con cerramientos de aluminio o aleaciones de aluminio, existen las siguientes desventajas a considerar:

- a) El aluminio en sí puede corroerse en ciertos suelos. La capa de material de aluminio corroído no es conductora para todos los propósitos prácticos de puesta a tierra.

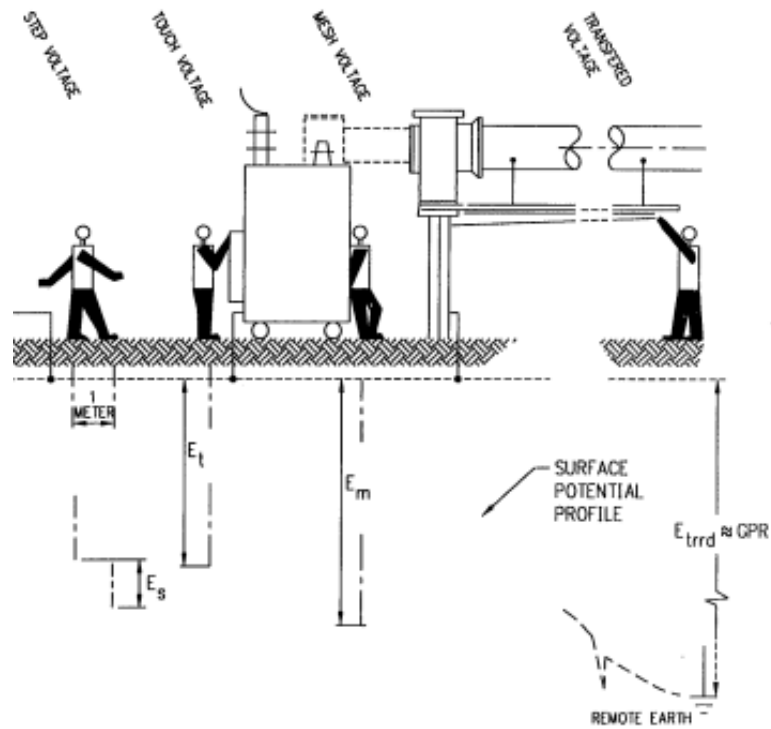
- b) Corrosión gradual causada por las corrientes alternas también puede ser un problema en determinadas condiciones.

*Acero.* El acero puede usarse para barras y conductores de red de tierra. Por supuesto, un diseño requiere que se preste atención a la corrosión del acero. El uso de un acero galvanizado o resistente a la corrosión, en combinación con protección catódica, es típico de sistemas de puesta a tierra de acero.

## **2.4 CRITERIOS DE Tensión DE PASO Y DE CONTACTO**

La seguridad de una persona depende de la prevención de cantidades críticas de energía de choque absorbida, ante de que se logre despejar la falla y se desenergizar el sistema. El máximo voltaje de conducción de cualquier circuito accidental no debe exceder los límites definidos, tanto para *Tensión de Paso* como para *Tensión de Contacto*, y dependiendo el criterio que se utilice según los que se encuentran en la Norma IEEE Std 80 – 2000, *Criterio para un peso corporal de 50 Kg* o el *Criterio para un peso corporal de 70 Kg*.

Ilustración 12. Situaciones básicas de choque



Fuente: RETIE (2013)

#### 2.4.1 Tensión de paso

Es la diferencia de potencial en la superficie que experimentada una persona con una distancia de 1 m entre sus pies, un paso, sin hacer contacto con algún objeto aterrizado a tierra.

La IEEE Std 80 establece la siguiente ecuación para sus cálculos:

$$E_S = (R_B + 2R_f).I_B \quad (18)$$

Dónde:

$R_B$ : Resistencia promedio del cuerpo humano.

$2 R_f$ : Resistencia a tierra de los dos pies separadas 1 m en serie sobre la capa superficial.

$I_B$ : Corriente tolerable en función del tiempo por el cuerpo humano, A.

*Criterio peso corporal de 50 Kg*

La tensión de paso para un peso corporal de 50 Kg es definida en la IEEE Std 80 con la siguiente ecuación:

$$E_{S\ 50} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (19)$$

$2 R_f = 6 C_s \rho_s$  : Resistencia a tierra de los dos pies separadas 1 m en serie sobre la capa superficial.

$C_s$ : Factor de disminución de la capa superficial.

$\rho_s$ : Resistividad del material de la capa superficial,  $\Omega.m$ .

*Criterio peso corporal de 70 Kg*

Según la IEEE Std 80, La tensión de paso está dada por:

$$E_{S\ 50} = (1000 + 6 C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (20)$$

Para las ecuaciones anteriores, se tiene que:

$R_B$ : 1000  $\Omega$ .

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}.$$

$t_s$ : Duración del choque, s.

$R_f / 2 = 1.5 C_s \rho_s$ : Resistencia a tierra de los dos pies juntos en serie sobre la capa superficial.

#### 2.4.2 Tensión de Contacto

Es la diferencia de potencial entre la Elevación de Potencial a Tierra (GPR) y el potencial en el punto de la superficie donde se encuentra la persona, tocando una estructura conectada a la malla de puesta a tierra.

Del mismo modo, la IEEE Std 80 establece una fórmula para el límite de la tensión de toque se tiene:

$$E_t = \left( R_B + \frac{R_f}{2} \right) \cdot I_B \quad (21)$$

Dónde

:

$R_B$ : Resistencia promedio del cuerpo humano.

$\frac{R_f}{2}$  : Resistencia a tierra de los dos pies separadas 1 m en serie sobre la capa superficial.

$I_B$ : Corriente tolerable en función del tiempo por el cuerpo humano, A.

La norma IEEE Std 80, establece las siguientes ecuaciones para efectos del criterio de peso corporal de 70 Kg

*Criterio peso corporal de 50 Kg*

$$E_{t\ 50} = (1000 + 1.5 C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (22)$$

Dónde:

$R_B$ : 1000  $\Omega$ .

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \text{ A}$$

$t_s$ : Duración del choque, s.

$R_f / 2 = 1.5 C_s \rho_s$ : Resistencia a tierra de los dos pies juntos sobre la capa superficial.

$C_s$ : Factor de disminución de la capa superficial.

$\rho_s$ : Resistividad del material de la capa superficial,  $\Omega \cdot \text{m}$ .

*Criterio Peso corporal de 70 kg*

$$E_{t\ 70} = (1000 + 1.5 C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (23)$$



Dónde:

$R_B$ : 1000  $\Omega$ .

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \text{ A.}$$

$t_s$ : Duración del choque, s.

$R_f / 2 = 1.5 C_s \rho_s$ : Resistencia a tierra de los dos pies juntos sobre la capa superficial.

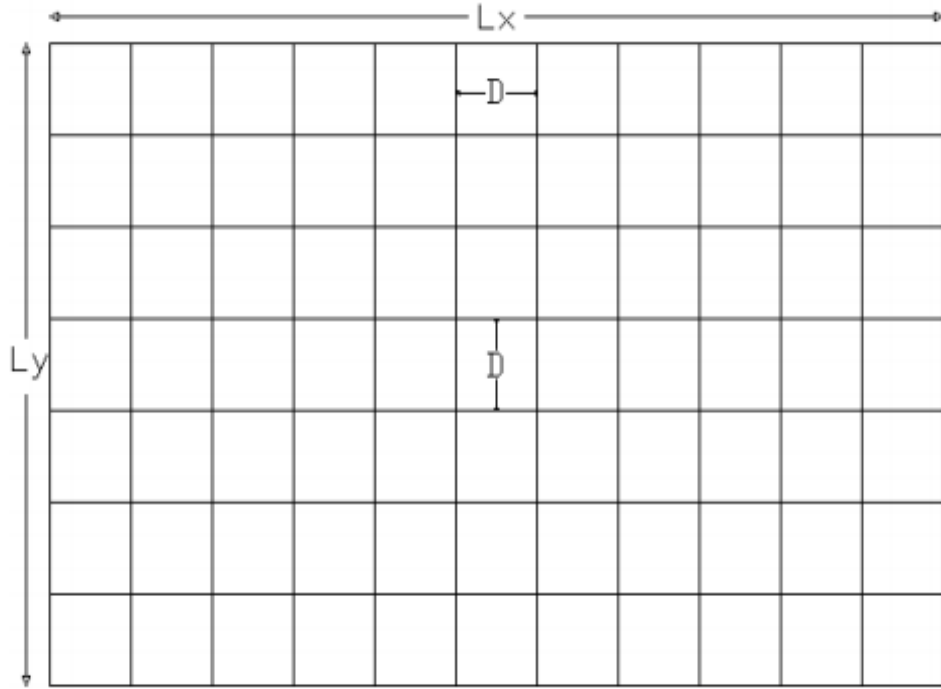
La norma IEEE Std 80 – 2000, se realiza una observación en cuanto a la capa superficial y la resistividad: “Si no se utiliza capa superficial protectora, entonces  $C_s=1$  y  $\rho_s=\rho$ ”.

## 2.5 DISEÑO PRELIMINAR

El Diseño preliminar hace referencia a parámetros que intervendrán directamente en la forma de la malla:

$D$ : Espaciamiento entre conductores paralelos, m.

Ilustración 13. Diseño preliminar de la malla.



Fuente: Ramírez, José S. y Cano, Eduardo A (2010). Sistema de puesta a tierra: Diseñado con IEEE 80 y evaluado con MEF

### 2.5.1 Factor geométrico

Según Sverak, como sigue:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \quad (24)$$

Dónde:

$d$ : Diámetro del conductor de la malla, m.

$h$ : Profundidad de conductores de la malla a tierra, m.

### 2.5.2 Factor de corrección de la malla

El factor de corrección,  $K_{ii}$ , para mallas con varillas a lo largo del perímetro, o en las esquinas de la cuadrícula, así como en el perímetro y en toda la zona de malla:

$$K_{ii} = 1 \quad (25)$$

Para mallas sin varillas o con sólo unas pocas, ninguna situada en las esquinas o en el perímetro:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} \quad (26)$$

### 2.5.3. Factor para efectos de a profundidad

Para mallas sin varillas en el perímetro o en las esquinas, pudiendo tener algunas en la parte central:

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (27) \longrightarrow \begin{array}{l} 1 \text{ m. Referencia de} \\ \text{profundidad de la} \\ \text{malla} \end{array}$$

### 2.5.4 Número efectivo de conductores

El número de conductores efectivos en paralelo en una malla rectangular o irregular es estimado, según la IEEE Std 80, con las siguientes ecuaciones:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (28)$$

Dónde:

$$n_a = \frac{2 L_C}{L_P} \quad (29); \quad n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4\sqrt{A}}} \quad (30); \quad n_c = \left[ \frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{\frac{0.7 A}{L_x \cdot L_y}} \quad (31);$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (32)$$

Dónde:

$L_C$ : Longitud total del conductor en la cuadrícula horizontal, m.

$L_P$ : Longitud de la red periférica, m.

$A$ : Área de la malla, m.

$L_x$ : Longitud máxima de la red en la dirección x, m.

$L_y$ : Longitud máxima de la red en la dirección y, m.

$D_m$ : Distancia máxima entre los dos puntos cualquiera en la red, m.

### Rejillas cuadradas

Para mallas cuadradas, el número efectivo de conductores, está dado por:

$$n = n_a = \frac{2 L_C}{L_P} \quad (33)$$

Ya que para efectos de rejillas cuadradas:

$n_b = 1$  para rejillas cuadradas.

$n_c = 1$  para rejillas cuadradas y rectangulares.

$n_d = 1$  para rejillas cuadradas, rectangulares y en forma de L.

### Rejillas Rectangulares

Para mallas cuadradas, el número efectivo de conductores está dado por:

$$n = n_a * n_b = \frac{2 L_C}{L_P} * \sqrt{\frac{L_P}{4\sqrt{A}}} \quad (34)$$

Para efectos de rejillas rectangulares

$n_c = 1$  para rejillas cuadradas y rectangulares.

$n_d = 1$  para rejillas cuadradas, rectangulares y en forma de L.

### 2.5.5 Factor de Irregularidad

El factor de irregularidad,  $K_i$ , utilizado en conjunción con la definida anteriormente  $n$  es:

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n \quad (35)$$

### 2.5.6 Longitud efectiva de cables y varillas

La longitud efectiva de cable y varillas enterradas para la tensión de malla sin varillas o con pocas varillas en el interior pero ninguna en las esquinas a lo largo del perímetro, está dada por:

$$L_M = L_C + L_R \quad (36)$$

$L_R$ : Longitud total de varillas enterradas, m.

Mientras que cuando se tienen varillas en las esquinas, así como a lo largo del perímetro y a lo largo de la red, la longitud efectiva de enterrado,  $L_M$ , es:

$$L_M = L_C + \left[ 1.55 + 122 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (37)$$

$L_r$ : Longitud promedio de cada varilla, m.

## 2.6 EVALUACIÓN DE RESISTENCIA DE TIERRA

Un sistema con buena conexión a tierra proporciona una baja resistencia a la tierra remota para minimizar la GPR. En la práctica, el GPR se incrementa proporcionalmente con la corriente de falla; entre más grande sea la corriente, menor debe ser el valor de la resistencia total del sistema.

Para la mayoría de subestaciones de transmisión y grandes subestaciones, la resistencia de tierra debe ser alrededor de 1  $\Omega$  o menos. Mientras que en las

más pequeñas de distribución, el rango generalmente aceptable es de 1 a 5  $\Omega$  dependiendo de las condiciones locales.

### 2.6.1 Cálculos simplificados.

Uno de los primeros pasos para determinar el tamaño y diseño básico de un sistema de puesta a tierra es la estimación de la resistencia total a tierra remota.

La ecuación básica determinar la resistencia de tierra de la subestación es:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (38)$$

Dónde:

$R_g$ : Resistencia de tierra de la subestación,  $\Omega$ .

$\rho$ : Resistividad del terreno,  $\Omega.m$ .

$A$ : Área ocupada por la cuadrícula del terreno,  $m^2$ .

Agregando un segundo término a la fórmula anterior, puede obtenerse un límite superior en la resistencia de tierra de la subestación.

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad (39)$$

Siendo  $L_T$  la longitud total de conductor enterrado, m.

Para tener en cuenta el efecto de la profundidad de la rejilla, Sverak planteó la ecuación:

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} + \left( 1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (40)$$

$h$ : Profundidad de la malla, m.

### 2.6.2 Ecuaciones de Schwarz

Schwarz desarrolló una serie de ecuaciones para determinar la resistencia de un sistema de puesta a tierra en un suelo homogéneo que consta de electrodos verticales y horizontales, en otras palabras, varillas y rejillas respectivamente. Inicialmente modificó la ecuación para el cálculo de la resistencia total del sistema,  $R_g$ .

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (41)$$

Dónde:

$R_1$ : Resistencia de tierra de los conductores de la red,  $\Omega$ .

$R_2$ : Resistencia de tierra de todas las barras de tierra,  $\Omega$ .

$R_m$ : Resistencia de tierra mutua entre  $R_1$  y  $R_2$ ,  $\Omega$ .

La resistencia de tierra de la malla está dada por:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[ \ln \left( \frac{2L_C}{a'} \right) + \frac{k_1 \cdot L_C}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (42)$$



Dónde:

$\rho$ : Resistividad del terreno,  $\Omega.m$ .

$L_C$ : Longitud total de todos los conductores de red conectado, m.

$a'$ : es  $\sqrt{a \cdot 2h}$  para los conductores enterrados a profundidad h, m. O

$a'$ : es  $a$  para conductores en la superficie de la tierra, m.

$2a$ : Área cubierta por los conductores,  $m^2$ .

$k_1, k_2$ : Son los coeficientes.

La resistencia de las varillas de tierra:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi \cdot n_R \cdot L_R} \left[ \ln \left( \frac{4L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 \cdot L_R}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (43)$$

Dónde:

$L_R$ : Longitud de cada varilla, m.

$2b$ : Diámetro de la varilla, m.

$n_R$ : Número de barras colocadas en el área A

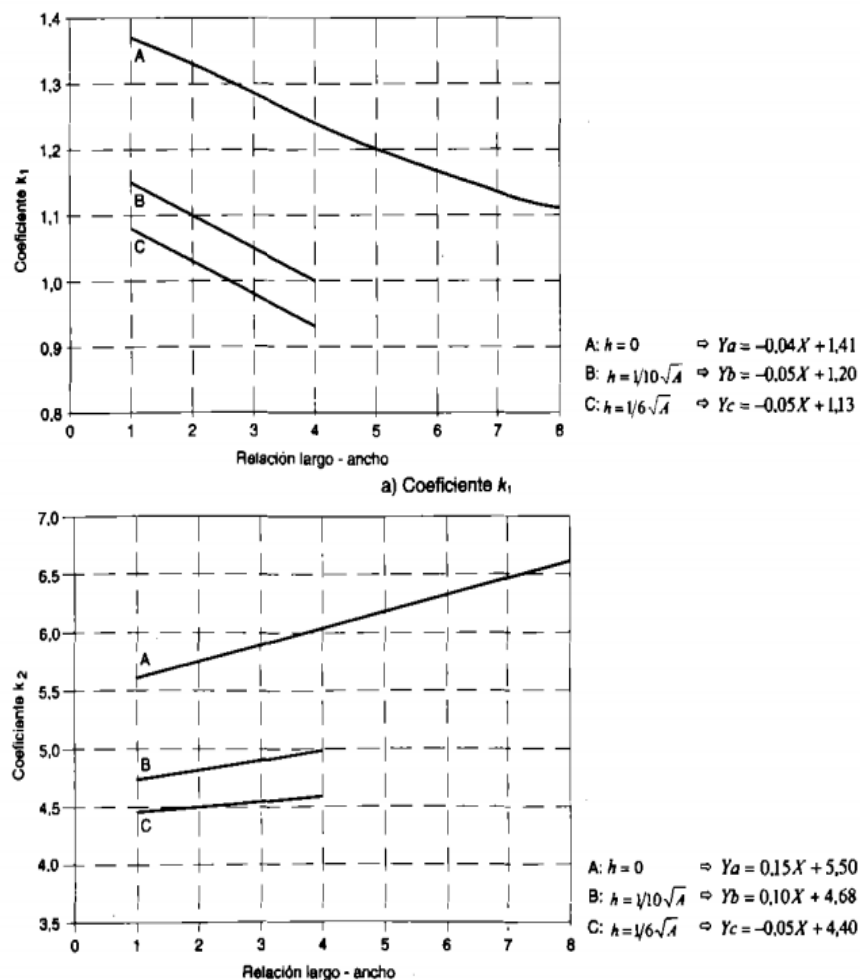
La resistencia de tierra mutua entre la malla y las varillas está dada por:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi \cdot L_C} \left[ \ln \left( \frac{2L_C}{L_r} \right) + \frac{k_1 \cdot L_C}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (44)$$

La resistencia de tierra combinada de la rejilla y las varillas será menor que la resistencia de tierra de cualquier componente por sí solo, pero será más alta que el de la combinación en paralelo.

La norma IEEE Std 80, registra el siguiente comentario de las ecuaciones de Schwarz, “Schwarz comparó los resultados de sus ecuaciones para trabajo teórico publicado previamente y modelo de pruebas para verificar la exactitud de sus ecuaciones. Desde que se publicaron en 1954, las ecuaciones de Schwarz han sido modificadas por Kerckel para proporcionar las ecuaciones para las constantes  $k_1$  y  $k_2$  y ampliado para incluir el uso de ecuaciones en dos capas del suelo”.

Ilustración 14. Coeficiente para las ecuaciones de Schwarz a)  $k_1$  y b)  $k_2$



Ramírez, Carlos Felipe (1991) Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión 2 Ed

## 2.7 ELEVACIÓN DE POTENCIAL A TIERRA (GPR)

El Cálculo de la Resistencia de tierra, facilita el segundo valor necesario para realizar el cálculo de GPR, Valor que se encuentra con la siguiente ecuación, determina en la Norma IEEE Std 80 – 2000:

$$GPR = I_G \cdot R_g \quad (45)$$

$I_G$ : Corriente máxima a disipar por la malla.

$R_g$ : Resistencia de la malla.

El valor de GPR permitirá determinar en primera instancia a través de la comparación con la Tensión de Toque calculada según el Criterio escogido (Peso Corporal de 50 Kg o Peso Corporal de 70 Kg).

Si el valor de GPR se encuentra por debajo de la Tensión de Toque calculada según cualquiera de los dos criterios,

$$GPR < Et_{(50 \text{ o } 70 \text{ Kg})} \quad (46)$$

Entonces no se hacen necesarios más cálculos y se puede dar por aceptado el diseño preliminar.

Pero dado el caso que el valor de GPR sea mayor que la Tensión de toque calculada según el criterio escogido,

$$GPR > Et_{(50 \text{ o } 70 \text{ Kg})} \quad (47)$$

Entonces se hace necesario un análisis adicional realizando el cálculo de las tensiones de malla y de paso real.

## 2.8 CÁLCULO DE LA TENSION MÁXIMA DE LA MALLA Y TENSION REAL DE PASO

### 2.8.1 Tensión máxima de malla, $E_m$ .

La norma IEEE Std 80, establece que, “Los valores de tensión de la malla se obtienen como producto del factor geométrico,  $K_m$ ; un factor correctivo,  $K_i$ , que representa para algunos del error introducido por la hipótesis formulada en derivar  $K_m$ ; la resistividad del terreno,  $\rho$ ; y el promedio actual por unidad de longitud efectiva enterrado del conductor del sistema de puesta a tierra ( $I_G/L_M$ )”.

$$E_m = \frac{K_m \cdot K_i \cdot \rho \cdot I_G}{L_M} \quad (48)$$

$K_m$ : Factor de geometría.

$K_i$ : Factor de corrección por geometría en forma de malla.

$I_G$ : Corriente máxima de malla, A

$\rho$ : Resistividad del suelo,  $\Omega \cdot m$ .

$L_M$ : Longitud efectiva de cable y varillas enterradas para tensión de retícula, m.

### 2.8.2 Tensión real de paso, $E_s$ .

Se obtienen los valores de tensión de paso con la siguiente ecuación:

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (49)$$

Con:

$L_s$ : Longitud efectiva de cables y varillas para la tensión de paso se define como:

$$L_s = 0,75 L_C + 0,85 L_R \quad (50)$$

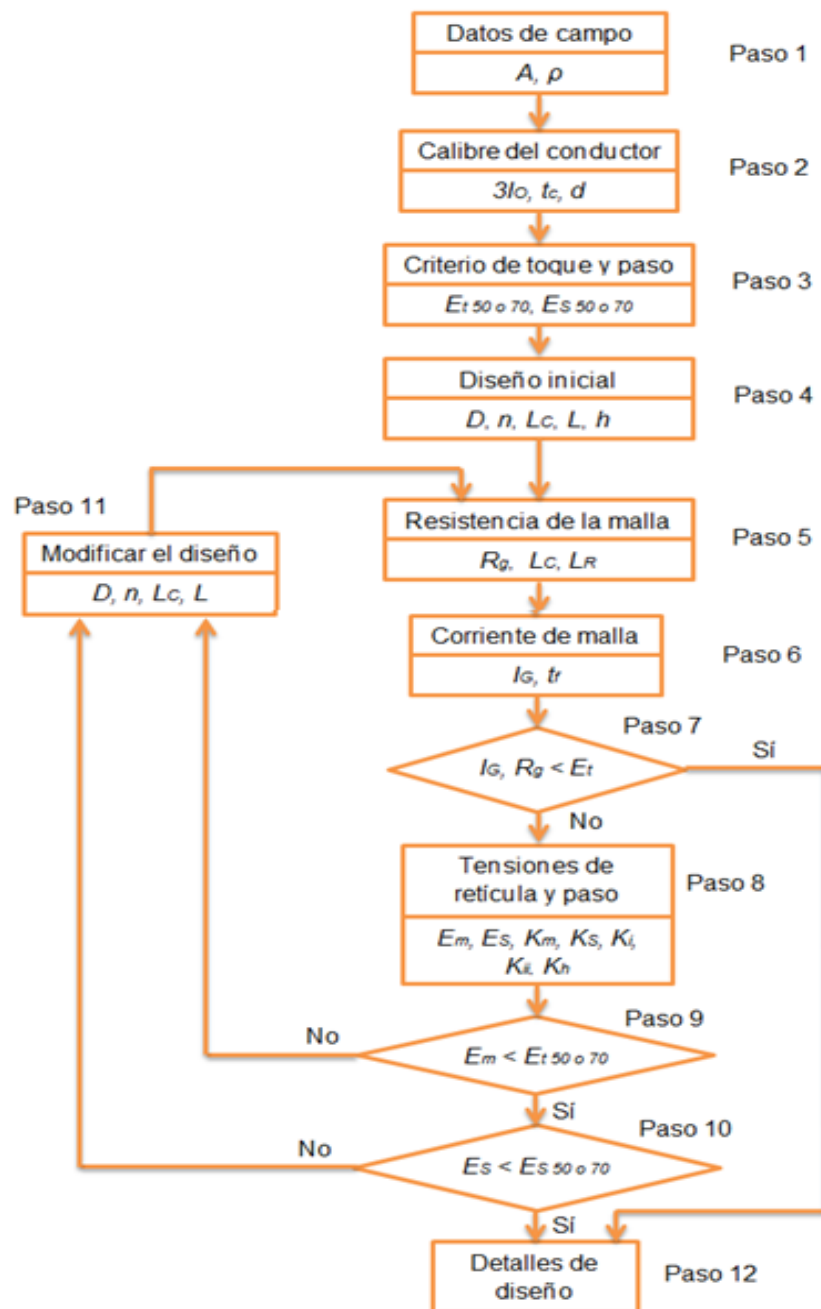
$K_s$ : Factor de geometría, dado por:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (51)$$

### 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Una serie de pasos deben ser llevados a cabo para que el diseño de puesta a tierra sea elaborado de manera adecuada evaluando los parámetros para poder realizar el siguiente paso.

Ilustración 15. Diagrama de Procesos para el Diseño de un SPT



Fuente: Troncoso (2014) de Norma IEEE Std 80 (2000)

El anterior Diagrama de procesos, extraído de la Norma IEEE Std 80, permite ver de forma resumida los pasos a seguir para la realización de un correcto diseño para un Sistema de Puesta a Tierra son:

### **Paso 1. Datos del terreno**

El plano de localización de la subestación debe permitir realizar una estimación del área de cubrimiento de la malla. Las mediciones de resistividad del suelo, para determinar el perfil de resistividad y el modelo necesitado (es decir, uniforme o dos capas). Es decir, los parámetros  $A$  y  $\rho$ .

### **Paso 2. Cálculo del Calibre del Conductor**

Se determina el calibre del conductor a utilizar para la puesta a tierra. La corriente de falla  $3I_0$  debe ser la máxima esperada futura corriente de falla que podría llegar a conducir algún conductor del sistema de tierra y el tiempo,  $t_c$ , deberá reflejar el tiempo máximo posible de interrupción.

### **Paso 3. Calcular las tensiones de toque y de paso**

Se determinan las tensiones de paso y de toque, según criterio seleccionado, 50 Kg de peso corporal o 70 Kg.

### **Paso 4. Diseño Preliminar**

Incluir en el diseño preliminar un conductor que rodee toda la periferia del área, además de conductores adecuados de manera que proporcionen un acceso a

los equipos. La estimación inicial del espaciamiento del conductor y la ubicación de las varillas a tierra deben basarse en la corriente  $I_G$  y el área que será conectada a tierra.

Asignar valores a los siguientes parámetros:

$D$ : Espaciamiento entre conductores paralelos, m.

$h$ : Profundidad de conductores de la malla a tierra, m.

### **Paso 5. Determinar la Resistencia de la Malla**

Se calcula la resistencia preliminar del sistema de puesta a tierra en suelo uniforme. Para el diseño final, deben hacerse cálculos más exactos precisos de la resistencia, considerando las varillas de tierra si es el caso.  $L_C$ ,  $L_R$ .

Para realizar el cálculo de la Resistencia de malla,  $R_g$ , es posible realizar los cálculos con las Ecuaciones de Schwarz para terreno de dos capas o a través de la Ecuación de Sverak.

### **Paso 6. Cálculo de Corriente máxima a disipar por la malla:**

Se calcula la corriente máxima a disipar por la malla,  $I_G$ . Para prevenir un sobredimensionamiento del sistema de puesta a tierra, considerando solo esa porción de la corriente total de falla,  $3I_0$ , que fluye a través de la red a la malla hacia una tierra remota.

Para realizar el cálculo de la corriente a disipar por la malla, se debe realizar el cálculo de los parámetros que intervienen sobre el valor de corriente máxima a disipar por la malla ( $I_G$ ), son:



Factor de decremento ( $D_f$ ), Corriente simétrica de malla ( $I_g$ ), Factor de división de corriente de falla ( $S_f$ ), Corriente simétrica de falla a tierra ( $I_f$ ), Corriente efectiva de falla asimétrica ( $I_F$ ) y el Factor de crecimiento ( $C_p$ ).

### **Paso 7. Cálculo de GPR y comparación con valor de $E_t$**

En este paso, se debe realizar el cálculo del parámetro  $GPR$ . Con  $GPR = I_G \cdot R_g$ , y se compara con el valor de la tensión de toque,  $E_t$ , (**Paso 3**) y si se encuentra por debajo, no se realizan más análisis y se realizan detalles finales del diseño, (**Paso 12**). Si por el contrario, el valor del  $GPR$  supera el valor de  $E_t$ , entonces se procede a realizar el siguiente paso.

### **Paso 8. Cálculo de tensión máxima de malla y real de paso**

Si no se cumple la condición anterior, se calcula la tensión de malla y la tensión de paso para la malla con suelo uniforme.

### **Paso 9. Comparar valores de Tensión de contacto**

Si la tensión de malla calculada está por debajo de la tensión de contacto tolerable, se continúa al siguiente paso; Si la tensión de malla calculada es mayor que el voltaje de contacto tolerable, se requiere revisión del diseño de malla (**Paso 11**).

### **Paso 10. Comparar valores de tensión de paso**

Si las tensiones de paso y contacto se encuentran por debajo de los tolerables, seguir al Paso 12. Si no, se requiere revisión, Paso 11.

### **Paso 11. Revisión del Diseño preliminar**

Si se llegase a exceder la tensión de paso y de contacto, es necesaria la revisión del diseño de la malla. Estas revisiones pueden incluir espaciamientos de conductores más pequeños, varillas adicionales, etc.

### **Paso 12. Refinamiento del diseño**

Después de cumplir con los requerimientos de tensiones de paso y contacto, se pueden requerir varillas de tierra y malla adicional.

Los conductores de red adicional pueden ser necesarios si el diseño de la rejilla no incluye conductores cerca del equipo que estará conectada a tierra. El diseño final también debe ser revisado para eliminar peligros debido al potencial transferido y riesgos asociados con áreas especiales de preocupación.

## **4. APLICATIVO PARA EL ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO**

### **4.1 PROGRAMA A UTILIZAR**

Para la realización del aplicativo a entregar como trabajo final del presente proyecto se utilizará el programa Microsoft Excel, debido a las facilidades de realización de una hoja de cálculo y poder realizar la relación entre varias ecuaciones y/o parámetros. Excel además cuenta con una herramienta denominada Desarrollador, facilitando el uso de Macros.

La macro, abreviatura de macroinstrucción. “Es un conjunto de instrucciones programadas en la hoja de cálculo electrónica de Excel, las cuales automatizan las operaciones que realiza la aplicación ofimática Excel con el objetivo de eliminar tareas repetitivas o realizar cálculos complejos en un corto espacio de tiempo y con una nula probabilidad de error”. [0]

Existen dos maneras de realizar macros en Excel:

- Mediante el uso de la grabadora de Macros.
- Mediante el uso del lenguaje VBA para programar Excel.

Las macros pueden ser utilizadas para realizar: Automatización de tareas repetitivas, Desarrollo de aplicaciones complejas, Desarrollo de nuevas funciones o aplicaciones dentro de la propia Excel, Comunicación entre aplicaciones compatibles con VBA como Word, Access, Outlook, Autocad, Creación de juegos dentro de la aplicación Excel.

## **4.2 DISEÑO DEL APLICATIVO**

La interfaz del aplicativo posee como característica principal, la facilidad de entendimiento por parte de cualquier usuario.

Aplicando los pasos explicados anteriormente en el Capítulo 3, el aplicativo fue diseñado de tal manera que siga ese paso a paso, para llevar un mejor manejo del uso del aplicativo.

El aplicativo desarrollado en Excel contará con cuatro Hojas visibles, acerca de las cuales se hará una breve explicación de su contenido a continuación:

### **Ingreso de datos**

Es la hoja donde se realiza la primera etapa del Estudio Técnico. El ingreso de los parámetros o datos de la Subestación conocidos y los tomados directamente del terreno.

### **Parámetros de entrada.**

Como parte del Diseño del Estudio Técnico se definieron los parámetros de entrada para lograr realizar a cabalidad los objetivos logrados.

Tabla 7. Parámetros de entrada del aplicativo.

DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD
Lado mayor de la malla, Lx	Lx	m
Lado menor de la malla, Ly	Ly	m
Corriente de falla, Lado AT	-	A
Corriente de falla, Lado BT	-	A
Duración de la falla, choque	ts, tf, tc	seg
Temperatura ambiente	ta	°C
Conductor a utilizar		
Criterio Tensiones Paso y toque		
Profundidad de Capa superficial	hs	m
Resistividad de Capa Superficial	$\rho_s$	$\Omega.m$
Distancia entre conductores	D	m
Profundidad de enterramiento de la malla	h	m
Cantidad de varillas enterradas	nr	-
Longitud de la varilla a tierra	Lr	m
Número de líneas de Transmisión	A	-
Número de neutros de Distribución	B	-
Resistencia eq. Cables de transmisión (R)	R	$\Omega$
Reactancia eq. Cables de transmisión (X)	X	$\Omega$
Factor de División de Corriente	Sf	%

Fuente: Troncoso (2014)

Una serie de pasos deben ser llevados a cabo para que el diseño de puesta a tierra sea elaborado de manera adecuada evaluando los parámetros para poder realizar el siguiente paso.

Los datos considerados como entrada para el Aplicativo desarrollado permiten realizar los cálculos necesarios para obtener los parámetros faltantes para completar el estudio técnico.

Sin embargo el Aplicativo fue desarrollado siguiendo el paso a paso que se explicó en el diagrama de procesos de la Ilustración 15 y explicado en el Capítulo 3 del presente escrito, por lo tanto el ingreso de los datos no es inmediato al abrir el programa.

El ingreso de las variables estará controlado por el paso que se esté realizando conforme vayamos avanzando en el aplicativo, de la siguiente manera:

Según el paso a paso establecido en el Capítulo 3, y que se puede visualizar en el Diagrama de Flujo (Ilustración 15):

### **Paso 1: Datos del terreno**

Lado mayor de la malla,  $L_x$

Lado menor de la malla,  $L_y$

Mediciones de Resistividad, Método Wenner.

### **Paso 2: Cálculo del Calibre del Conductor**

Corriente de falla, Lado AT

Corriente de falla, Lado BT

Duración de la falla,  $t_s$ ,  $t_c$ ,  $t_f$

Temperatura ambiente,  $T_a$

Conductor a utilizar

### **Paso 3: Definir criterio de tensiones de paso y de toque**

Criterio de Tensión de Paso y de Toque

#### **Paso 4: Diseño preliminar**

Profundidad de la capa superficial,  $h_s$

Resistividad de la capa superficial,  $\rho_s$

Distancia entre conductores,  $D$

Profundidad de enterramiento de la malla,  $h$

Cantidad de varillas enterradas,  $n_r$

Longitud de la varilla a tierra,  $L_r$

#### **Paso 5: Resistencia de la malla**

Número de líneas de transmisión,  $A$

Número de neutros de distribución,  $B$

Resistencia eq cables de transmisión,  $R$

Reactancia eq cables de transmisión,  $X$

Factor de divisor de corriente,  $S_f$

## Gráficas Sf

En esta Hoja se encuentran las gráficas para determinar el valor del Factor de División de Corriente. Variable que depende de la cantidad de líneas de Transmisión y de los neutros de Distribución de la Subestación.

## Resultados Estudio Técnico

Esta hoja permitirá visualizar los datos calculados a partir de los ingresados en la hoja *Ingreso de Datos*, se podrá apreciar también la opción de imprimir los datos en un informe para la facilidad de dar a conocer los valores obtenidos.

Los datos calculados o datos de salida del Aplicativo se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 8. Parámetros de salida del aplicativo

DESCRIPCIÓN	SIMBOLO	UNIDAD
Área	A	m <sup>2</sup>
Resistividad	$\rho$	$\Omega.m$
Profundidad de la primera capa	h1	m
Diámetro del conductor	dc	mm <sup>2</sup>
		kcmil
		m
Tensión de paso (según criterio)	Es	V
Tensión de contacto (Según criterio)	Et	V
Número de Conductores paralelos a Eje X	N	-
Número de Conductores paralelos al Eje Y	M	-
Longitud total de Conductor de la red	Lc	m
Longitud total de varillas	LR	m
Longitud total de conductor enterrado	LT	m
Resistencia de malla	Rg	$\Omega$
Máxima corriente a disipar	IG	A
Elevación de potencial a tierra	GPR	V
Tensión de la malla	Em	V
Tensión real de paso	Ep	V

Fuente: Troncoso (2014)



## Datos Estudio Económico

La hoja de Datos de estudio Económico, es un Diseño para complementar las actividades de Estudio Técnico, y permita conocer el valor de ciertas herramientas y parámetros calculados en el ámbito técnico.

### 4.3 VALIDACIÓN DEL ESTUDIO TÉCNICO DEL APLICATIVO

Para efectos de validación del aplicativo, se escogió un Ejemplo del Libro de Subestaciones: “Ramírez, Carlos F. Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión. 2 Ed. Mejía Villegas S.A. Ingenieros Consultores”, tomando como referencia un Ejemplo que se encuentra en el Capítulo 12. Malla de tierra, en la Página 586.

La validación se desarrollará paso a paso con la finalidad de mostrar inmediatamente la veracidad del estudio técnico del aplicativo.

#### Paso 1: Validación, Datos del Terreno

Tabla 9. Datos del terreno, Validación

DATOS CALCULADOS			
DATOS EJEMPLO		DATOS APLICATIVO	
Área	5600	Área	5600
Resistividad	400	Resistividad	400,87

Fuente: Troncoso (2014)

**“Nota:** Para los datos de Resistividad para el aplicativo, se realizó una aproximación al dato ofrecido por el ejemplo tomado para la validación.”

## Paso 2: Validación, Cálculo del Calibre del Conductor

Tabla 10. Calibre del Conductor, Validación

DATOS CALCULADOS			
DATOS EJEMPLO		DATOS APLICATIVO	
Calibre del Conductor	4/0	Calibre del Conductor	4/0

Fuente: Troncoso (2014)

## Paso 3: Validación, Criterio de Tensión de Contacto y de Paso

El criterio utilizado fue para un peso corporal de 70 Kg, los valores de los parámetros utilizados fueron:

Espesor capa superficial, hm: 0.1 m

Resistividad de la capa superficial: 2500  $\Omega$ .m

Tabla 11. Factor de reducción para Criterios de Tensión

DATOS CALCULADOS			
DATOS EJEMPLO		DATOS APLICATIVO	
Factor de reducción	0,74	Factor de reducción	0,7394

Fuente: Troncoso (2014)

## Paso 4: Validación, Diseño Preliminar

Datos de entrada:

Distancia entre conductores: 7 m

Número de varillas: 40

Longitud de Varillas: 2.4 m

Profundidad de enterramiento de la malla: 0.5 m

Tabla 12.Datos de diseño preliminar, Validación.

DATOS CALCULADOS			
DATOS EJEMPLO		DATOS APLICATIVO	
Longitud de conductor en red	1720	Longitud de conductor en red	1750
Longitud de varilla enterrada	96	Longitud de varilla enterrada	96
Longitud Total	1816	Longitud Total	1846

Fuente: Troncoso (2014)

La diferencia entre las longitudes de conductor se debe primordialmente a la facilidad que se encuentra para aproximar el número de conductores en cada uno de los ejes, según bien convenga, pero para el caso del Aplicativo, la aproximación se hace al número inmediatamente mayor.

#### **Paso 5: Validación, Determinar la Resistencia de la malla, $R_g$**

Tabla 13.Datos de Resistencia de malla, Validación.

DATOS CALCULADOS			
DATOS EJEMPLO		DATOS APLICATIVO	
Resistencia de malla, $R_g$	2,58	Resistencia de malla, $R_g$	2,578

Fuente: Troncoso (2014)

### **Paso 6: Validación, Corriente máxima a disipar por la malla, $I_G$**

Tabla 14, Corriente máxima, Validación

<b>DATOS CALCULADOS</b>			
<b>DATOS EJEMPLO</b>		<b>DATOS APLICATIVO</b>	
Corriente máxima a disipar	1500	Corriente máxima a disipar	1507,94

Fuente: Troncoso (2014)

Para el cálculo de la corriente máxima, se tomaron como datos los siguientes:

Máxima Corriente de falla: 10000 A

Número de líneas de transmisión: 1; Resistencia 15  $\Omega$

Número de líneas de distribución: 4; Resistencia 25  $\Omega$

Factor de división de corriente, Sf: 15 %

### **Paso 7: Cálculo de GPR**

Tabla 15. Elevación de potencial, Validación

<b>DATOS CALCULADOS</b>			
<b>DATOS EJEMPLO</b>		<b>DATOS APLICATIVO</b>	
Elevación de potencial a tierra	3870	Elevación de potencial a tierra	3887,52

Fuente: Troncoso (2014)

Debido a que el valor del GPR calculado supero los límites de tensión de toque permitida, entonces se sigue al paso 8.

### **Paso 8: Cálculo de tensiones máxima de malla y real de paso**

Tabla 16. Datos de tensiones, máxima de malla y real de paso

<b>DATOS CALCULADOS</b>			
<b>DATOS EJEMPLO</b>		<b>DATOS APLICATIVO</b>	
Tensión máxima de malla	560,4	Tensión máxima de malla	584,61
Tensión real de paso	416,3	Tensión real de Paso	417,84

Fuente: Troncoso (2014)

La tensión máxima de malla y la tensión real de paso, calculadas con el aplicativo desarrollado, presentan una leve desviación, debido a los valores aproximados que se tomaron para cada uno de los parámetros anteriores. Que se encontraban por encima de los valores del ejemplo.

## **4.4 ESTUDIO ECONÓMICO**

Como extensión de todo buen estudio realizado con la firme intención de llevar a cabo un proyecto, conocer el costo de los materiales y de los elementos que intervienen directamente en el proceso, desde sus comienzos hasta finalizar los últimos detalles, es de vital importancia la adición de un Estudio Económico, para determinar si los recursos económicos con los que se cuenta en la actualidad son suficientes o bastan para el inicio de la labor de elaboración de lo que es en este caso el Sistema de Puesta a Tierra.

El estudio técnico realizado determina el número de varillas a utilizar, la longitud total de cable desnudo, y todos los elementos que se instalan directamente en el sitio, en la malla, el SPT; Hay elementos que intervienen directamente en la instalación o montaje del Sistema de Puesta a Tierra, pero muchos de estos no quedan adheridos a él. Solo cumplen función de herramientas o útiles para hacer un montaje correcto.

Para efectos de cálculo de los costos económicos, estos deben ser insertados por el usuario, ya que su variabilidad no puede ser determinada a través de factor alguno, difiriendo por factores como sitio, cantidad, lugar o Ciudad y hasta País.

Para uso de adecuado de la herramienta se recomienda realizar la lectura del manual anexo al final del documento.

## CONCLUSIONES

La investigación realizada, acerca de los parámetros que intervienen en los cálculos realizados para el diseño técnico de un Sistema de Puesta a Tierra, demuestran la importancia de llevar a cabo unos buenos cálculos que permitan obtener de manera óptima los diferentes grupos de parámetros que determinarán si las funciones de la malla a tierra de disipar las corrientes de falla y salvaguardar a las personas que interactúan con los equipos instalados en el sitio de instalación de la malla se están realizando a cabalidad.

El método de medición de resistividad aplicado al Aplicativo desarrollado es el Método Wenner, ya que a lo largo de la investigación se confirmó que éste método ofrece mejores datos y mayor aproximación del estado del suelo y la resistividad del mismo.

Se optó por el modelo de dos capas, porque brinda mayor aproximación de los parámetros reales del suelo debido a que tiene en cuenta mayor profundidad para realizar el análisis de la resistividad.

La validación del aplicativo permitió verificar a través de los resultados, la obtención de una herramienta capaz de calcular y analizar los parámetros necesarios para la comprobación de un diseño de Sistema de Puesta a Tierra, además a través de la validación del Aplicativo se comprobó la rapidez con la que se obtienen los datos, que comparado con una realización de manera manual requeriría de mayor tiempo.

El Aplicativo desarrollado presenta como ventajas principales, a comparación con los aplicativos existentes, la facilidad de interpretación y entendimiento de la interfaz de Excel, como punto fuerte para su uso; la reducción en el tiempo de ejecución del Estudio técnico en comparación con la realización de los

cálculos a mano y el no costo que representa su uso, puesto que los programas existentes carecen de su compra para poder tener acceso a ellos.



## **RECOMENDACIONES**

Para la utilización del Aplicativo entregado se hace necesaria la utilización del Método de Medición de resistividad del terreno el Método de cuatro puntos, igualmente espaciados, Método Wenner, pero también se puede utilizar con el Método de cuatro puntos desigualmente espaciados o Método Schlumberger-Palmer. Ya que el aplicativo ha sido desarrollado para el ingreso de varios datos de mediciones realizadas, con la finalidad de brindar facilidad en el caso de usar este tipo de métodos.

Se recomienda también realizar la lectura complementaria del MANUAL DE USO DEL APLICATIVO PARA CÁLCULO DE SPT, expuesto como ANEXO A del presente documento.

## BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA, Patricia y TRUJILLO, Juan C. Microsoft, Excel avanzado y macros. Quito Ecuador, Centro de Educación Continua. Escuela Politécnica Nacional, 2007. Disponible en: [http://cmelendez.wikispaces.com/file/view/Tema\\_1\\_Validacion\\_de\\_datos.pdf/68331105/Tema\\_1\\_Validacion\\_de\\_datos.pdf](http://cmelendez.wikispaces.com/file/view/Tema_1_Validacion_de_datos.pdf/68331105/Tema_1_Validacion_de_datos.pdf)

APONTE, Guillermo M. Puesta a tierra. Geiico S.A., Gestión de Información, Ingeniería y conocimiento. Julio, 2009. [http://www.geiico.com.co/geiico/Publica/Upload/Publico/7\\_parte\\_5\\_p\\_a\\_tierra.pdf](http://www.geiico.com.co/geiico/Publica/Upload/Publico/7_parte_5_p_a_tierra.pdf)

BLANDON, Jaime. Estado del arte en el diseño de mallas a tierra de subestaciones, 2005. Disponible en: <http://www.gamma.co/pdf/boletines/tecnicos/boletin16.pdf>

CHINCHILLA, Luis. Diseño del Sistema de Puesta a Tierra de una Planta Termoeléctrica de Generación. Caracas, Universidad Central de Venezuela, 2008. 94 p.

DE LA VEGA, Miguel. Problemas de Ingeniería de Puestas a Tierra. 2° Edición. Limusa Noriega Editores. Grupo Noriega Editores. México DF, 2002. 415 p.

ESCAMILLA, Imelda. Taller: EXCEL. Evaluación de funciones y creación de macros con Excel. Disponible en: <http://www.ecorfan.org/congresos/3erannual/Funciones%20y%20macros%20con%20Excel.pdf>

HARPER, Henríquez. Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas. Segunda Edición. Limusa Noriega Editores. Grupo Noriega Editores. México DF, 2005. Capítulo 7. 454 - 477 p.

HURTADO, Santiago e INGA, Luis. Diseño de malla Puesta a Tierra (Zona de cancha Colegio Domingo Comin). Trabajo de grado Ingeniero Eléctrico con mención en Sistemas de Potencia y Diseño de Maquinas. Guayaquil, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, Sede Guayaquil. Facultad de ingeniería. Carrera Ingeniería Eléctrica, 2010. 91 p.

IEEE Standard 80-2000, Guide for Safety in AC Substations Grounding (Revision of IEEE Std 80-1986)", New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Enero 2000.

IEEE Standard 80-1986, Guide for Safety in AC Substations Grounding", New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1986.

IEEE Standard 81-1983, Guide for measuring Earth resistivity, ground impedance, and Earth surface potentials of a ground system, New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers, September 1981.

IEEE Standard 142-2007, Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (Revision of IEEE Std 142-1972), New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Junio 2007.

JÁCOME, Luis F. Sistemas de puesta a tierra, Protección para la vida humana. 2011.

[http://cursos.eie.ucr.ac.cr/claroline/backends/download.php?url=L01hdGVyaWFsZXNfY2xhc2VzL05FQ18yNTBfLV9JRUVFLnBkZg%3D%3D&cidReset=true&cidReq=IE\\_1071](http://cursos.eie.ucr.ac.cr/claroline/backends/download.php?url=L01hdGVyaWFsZXNfY2xhc2VzL05FQ18yNTBfLV9JRUVFLnBkZg%3D%3D&cidReset=true&cidReq=IE_1071)

Manual Microsoft Office / Excel 2010. Briik.  
<http://www.uv.mx/personal/llopez/files/2013/03/Manual-Microsoft-Office-Excel-2010.pdf>

MARIANI, Eduardo. Sistema de puesta a tierra para instalaciones de baja tensión. Disponible en: <http://www.ieee.org.ar/downloads/2007-mariani-tierra.pdf>

Mass@Tierra. ABC De los Sistemas De Puesta a Tierra y Pararrayos. Disponible en: [http://massatierra.net/download/ABC\\_Sistemas\\_PuestaTierra\\_y\\_Pararrayos\\_v03-03-12.pdf](http://massatierra.net/download/ABC_Sistemas_PuestaTierra_y_Pararrayos_v03-03-12.pdf)

MEJÍA, Wilson A. Diseño de la malla de Puesta a Tierra para la Subestación tipo interior de 225 KVA, en las instalaciones de la Escuela Superior de Administración Pública ESAP, Localizadas en la Ciudad de Bogotá. Bogotá. Escuela Superior de Administración Pública, 2011. 24 p.

MORALES, Nelson. Mallas de Tierra. Adaptación y traducción de la publicación N° 119 de la Copper Development Association, Inglaterra "Earthing Practice". Santiago de Chile. Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 1999. 29 p.

PACHECO, Ángel T. y Jiménez, Jonathan M. Diseño de Sistemas de Puesta a tierra partiendo de un Modelo Biestratificado de Terreno, Aplicando un Software Computacional en el Sector Industrial. Cuenca, Ecuador. Universidad Politécnica Salesiana. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2013. 135 p.

PANIAGUA, Andrés. Estudio General de Puesta a Tierra en Subestaciones Eléctricas. Elaboración de Herramienta informática de Cálculo con Aplicación a diferentes aplicaciones. Madrid. Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2010. 75 p.

¿Qué es Excel?, ¿Qué son las macros?, Disponible en: <http://www.queesexcel.net/que-son-las-macros-excel.html>

RAMÍREZ, Carlos Felipe. Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión. 2 Ed. Mejía Villegas S.A. Ingenieros Consultores, 1991. Capítulo 12.

RAMÍREZ, José S. y CANO, Eduardo A. Sistema de puesta a tierra: Diseñado con IEEE 80 y evaluado con MEF, 2010. 122 p.

RAMÍREZ, Judith A. Propuesta de Procedimiento para la medición de la Resistividad del Suelo y la Resistencia de Puesta a Tierra en líneas de transmisión. Bucaramanga, Santander. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2008. 196 p.

Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), Bogotá DC. Ministro de Minas y Energías, 2013. Capítulo 2. Artículo 15. 62 – 71 p.

ROGLE. Reengineering Operations GroupWork Logistics Excellence. Manual Básico para empezar a trabajar con macros de Visual Basic para Excel.

ROJAS, Gregor. Manuel de sistemas de puestas a tierra. Capítulo 1. 35 p.  
<http://hugarcapella.files.wordpress.com/2010/03/manual-de-puesta-a-tierra.pdf>

SANCHEZ, Nelson. Estudio de Sistema de Puesta a Tierra. Barcelona, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui. Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, 2009. 221 p.

SAYAGO, Iliana. Metodología para el Diseño de un Sistema de Puesta a Tierra en recintos con Subestaciones Compactas para Media Tensión (5-36 KV). Bárbula. Universidad de Carabobo. Escuela de Ingeniería Eléctrica, 2006. 160 p.

VALLEJO, Ángeles. Manual de Excel 2010 Avanzado. Disponible en:  
<http://ticsyformacion.com/2013/07/06/manual-de-excel-2010-avanzado-manual-microsoft/>

# **ANEXOS**

**ANEXO A. MANUAL DE USO PARA EL APLICATIVO DEL ESTUDIO  
TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPT)  
APLICANDO EL MODELO DE DOS CAPAS.**

**TRONCOSO MENDOZA SONNI ALEXANDER**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
BARRANQUILLA  
2014**



## MANUAL DE USO PARA EL APLICATIVO DEL ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPT) APLICANDO EL MODELO DE DOS CAPAS.

El aplicativo para el Diseño técnico y económico de Sistema de Puesta a Tierra, se encuentra dividido en 4 hojas, el proceso para el uso se explicará a continuación.

Cabe resaltar que el aplicativo fue creado en Microsoft Excel 2010, por lo tanto es la versión en la que presentará un óptimo funcionamiento. Las macros creadas solo funcionarán siempre y cuando se habilite la opción *Desarrollador*.

Las hojas que hacen parte de documento son:

Ingreso de datos, Gráficas Sf, Resultados Estudio Técnico, Datos Estudio Económico.

Figura 1. Interfaz principal del Aplicativo

The screenshot displays the main interface of the application, which is a Microsoft Excel spreadsheet. The interface is organized into several sections:

- Header:** "Aplicativo para el Estudio Técnico y Económico para un Sistema de Puesta a Tierra Basado en la norma IEEE Std 80 - 2000 'Guide for Safety in AC Substation Grounding'".
- Author:** "Realizado por: Ing Sonni Troncoso Mendoza 2014".
- Buttons:** "NUEVO PROYECTO" and "RESULTADOS ESTUDIO TÉCNICO".
- Form Section:** "DATOS DEL TERRENO (PASO 1)". It includes a table for "Área disponible para la malla" with columns: Descripción, Valor / Cantidad, and Unidad. The table has two rows: "Lado Mayor, Lx" and "Lado Menor, Ly", both with units in meters (m).
- Form Section:** "MEDICIONES DE RESISTIVIDAD, MÉTODO WENNER". It includes a table for "TABLA DE MEDICIONES" with columns: Medida #, Distancia a (m), R (Ω), and  $pa=2naR (Ωm)$ .
- Instructions:** "¿Cómo se completa?" with two steps: 1. Digite las Distancias a las cuales realizó las mediciones. 2. Si midió datos de Resistencia, dígtelos y presione el botón Calcular Resistividades. Pero si midió Resistividad, dígtelos y presione el botón Procesar mediciones.

Para el uso correcto del aplicativo se llevará a cabo una explicación por Hoja, permitiendo al usuario mayor entendimiento del Aplicativo.

Como primera observación, tenga en cuenta que:

El aplicativo cuenta en toda su extensión con varios botones como éste, la intención del botón “ENVIAR DATOS”, es precisamente darle continuidad al desarrollo del Estudio Técnico, por lo tanto al terminar cada paso, se recomienda para uso correcto del Aplicativo presionarlo en cada final de los pasos.

Figura 2. Botón ENVIAR DATOS en Aplicativo



### Hoja 1: Ingreso de datos

Es la hoja donde se realiza la primera etapa del Estudio Técnico. El ingreso de los parámetros o datos de la Subestación conocidos y los tomados directamente del terreno.

Como el aplicativo fue realizado con la guía de paso a paso que se encuentra en la Norma IEEE Std 80 – 2000, el ingreso de los parámetros de entrada se realiza a medida que se vaya avanzando en el paso siguiente.

#### Paso 1: Datos del terreno

**Área del lugar.** Para efectos del aplicativo el área es un dato de entrada en Variables de Lado mayor de la malla y Lado menor de la malla,  $L_x$  y  $L_y$

respectivamente. Para la determinación del área y obtenerla como un dato Calculado.

La identificación de Lado mayor (Lx) y lado menor (Ly) han sido incluida con la intención de que el usuario ingrese los valores de esa manera en caso de ser diferentes en cuanto al valor, de lo contrario no hay inconveniente alguno al presentarse una igualdad entre esos valores digitados.

Figura 3. Área disponible, Lx y Ly.

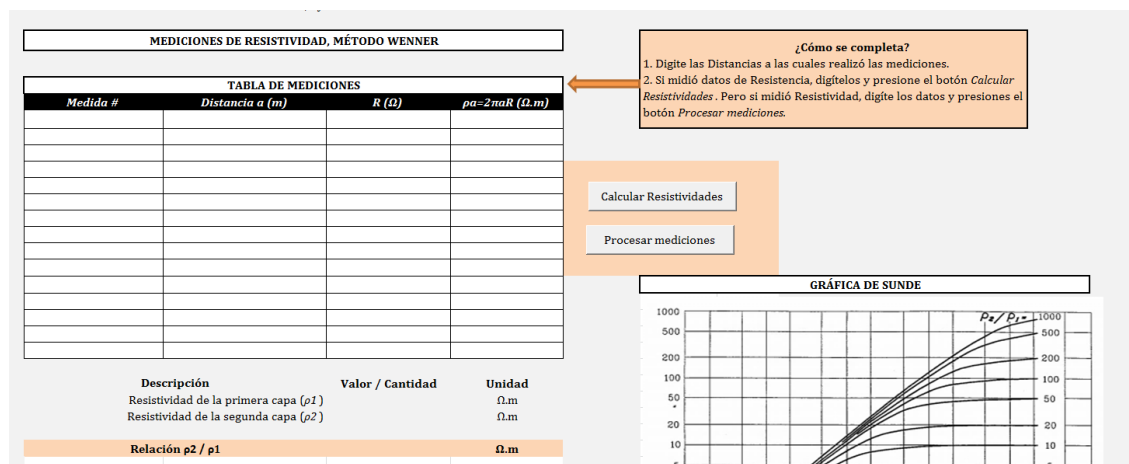
DATOS DEL TERRENO (PASO 1)		
Área disponible para la malla		
Descripción	Valor / Cantidad	Unidad
Lado Mayor, Lx		m
Lado Menor, Ly		m

### *Mediciones de Resistividad*

Para efectos del aplicativo, el método a utilizar para el desarrollo del estudio técnico es el Método de cuatro Puntos igualmente espaciados, Método Wenner. Y esto es porque el Método de cuatro puntos es el más exacto en la práctica para realizar la medición de la resistividad. Y para efectos de análisis de las mediciones realizadas, el Modelo de dos capas que es una representación muy exacta de las condiciones reales del suelo.

Los datos de entrada dependen de la medición que se haya realizado directamente en el terreno:

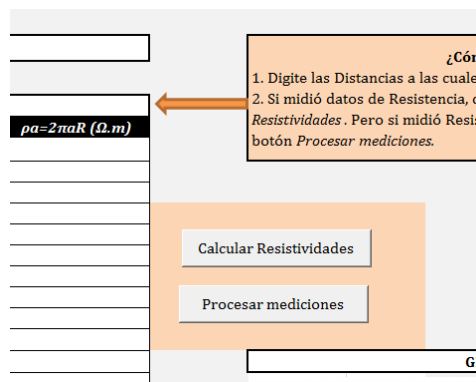
- *Resistividad,  $\rho_a$* . Para las ocasiones en las cuales las mediciones se realicen con equipos como el telurómetro, que tiene la posibilidad de entregar datos de Resistividad, entonces los datos de entrada será la Resistividad para cada distancia a previamente digitada.



1. Digite las Distancias a las cuales realizó las mediciones.

2. Si midió datos de Resistencia, digítelos y presione el botón Calcular Resistividades. Pero si midió Resistividad, digite los datos y presiones el botón Procesar mediciones.

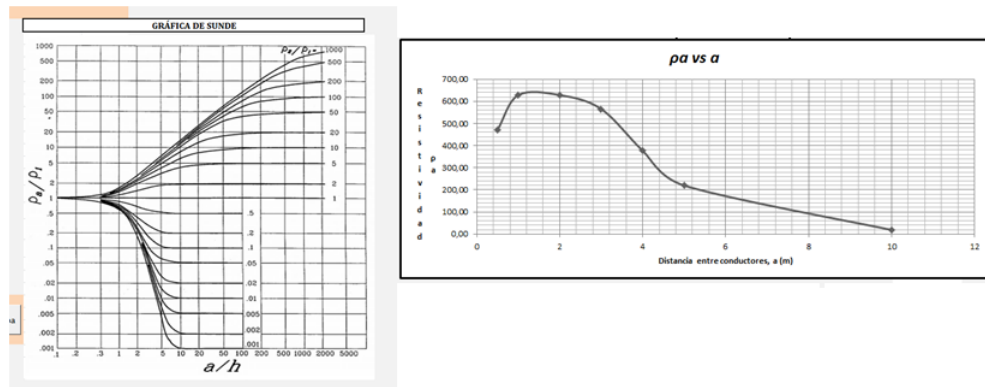
Figura 5. Botones de *Calcular Resistividades* y *Procesar Mediciones*.



- Procesar en el aplicativo tiene como significado, avanzar al siguiente paso, es decir, ordenar a la macro ejecutarse para lograr la obtención de los datos relacionados con los parámetros de entrada.

El Paso 1, es el primero en necesitar acompañamiento por parte del usuario en su paso a paso de manera individual, esto se debe a la necesidad de verificar las *Gráfica de Sunde* y la *Gráfica de  $\rho a$  vs  $a$*  (Resistividad VS Espaciamento entre conductores).

Figura 6. Gráfica de Sunde y Gráfica de  $\rho_a$  vs  $a$  (Resistividad VS Espaciamiento entre conductores)



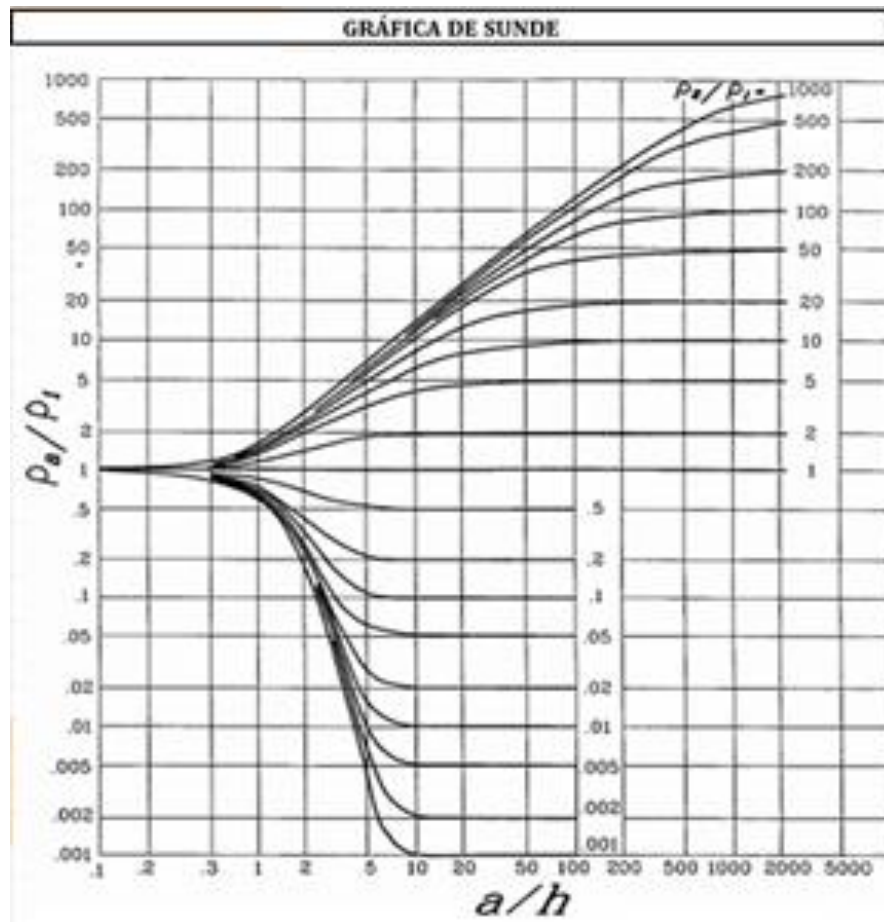
Por lo tanto, al *Procesar mediciones* se obtendrá un valor de  $\rho_2/\rho_1$  el cual deberá ser ubicado en la Gráfica de Sunde, y trazar una curva tal como las que se aprecian en la Gráfica de Sunde. Luego determinar un valor  $\rho_a/\rho_1$  tal que se encuentre dentro de la región pendiente de la curva trazada.

Por ejemplo:

Para un valor de  $\rho_2/\rho_1 = 0.2$ .

El valor seleccionado para  $\rho_a/\rho_1$  sería 0.5

Figura 7. Gráfica de Sunde



Con el valor de la relación  $p_2/p_1$  graficado, se busca un valor en el Eje Y para la relación  $p_a/p_1$ , e inmediatamente a la pendiente de esta curva, se le relaciona la intersección con el Eje X, para obtener un valor de  $a/h$ .

Los valores de  $p_a/p_1$  y  $a/h$ , deben ser digitados por el usuario en los siguientes espacios:

Figura 8.  $p_a/p_1$  y  $a/h$

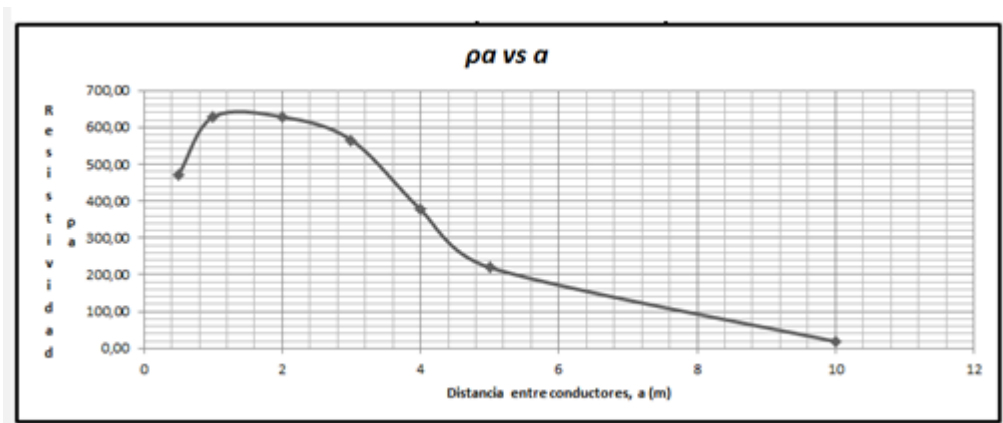
Descripción	Valor / Cantidad	Unidad
Relación $\rho a / \rho l$		-
Relación $a / h$		-
Resistividad calculada, $\rho a$		$\Omega \cdot m$

Calcular  $\rho a$

Una vez digitados los valores mencionados anteriormente, presionar el Botón *Calcular  $\rho a$* .

El valor calculado correspondiente a  $\rho a$ , hallarlo en la gráfica  $\rho a$  vs  $a$  y en la intersección con la curva, leer el valor en el Eje X para “ $a$ ” (Distancia entre conductores), para realizar el cálculo de la Profundidad de la Primera Capa.

Figura 8. Gráfica  $\rho a$  vs  $a$



Nota: El aplicativo cuenta con las leyendas necesarias para la elaboración de un Estudio técnico, por lo que se recomienda también al usuario, tener en cuenta las leyendas presentes en él.

Al finalizar los pasos anteriores, Presionar el botón “ENVIAR DATOS”.



## Paso 2: Calibre del conductor.

Considerando como datos de entrada:

- Corrientes de falla para Lado Alta Tensión y para el Lado de Baja Tensión de la Subestación. (3/o)
- Duración de la falla,  $t_f$ . Tiempo que demora el sistema en despejar la falla.
- Temperatura ambiente,  $t_a$ .
- Selección del Conductor. En el aplicativo la casilla del conductor a utilizar, hace parte de una lista desplegable donde se puede escoger el conductor a gusto de cada quien pero todo según la norma IEEE Std 80.

Figura 9. Aplicativo. Para el cálculo del calibre del conductor.

PARA EL CÁLCULO DEL CONDUCTOR (PASO 2)		
Descripción	Valor / Cantidad	Unidad
Corriente de falla a tierra, Lado AT		A
Corriente de falla a tierra, Lado BT		A
Duración de la falla, Duración de Choque, $t_f$ y $t_c$		seg
Temperatura ambiente, $t_a$		°C

Conductor a utilizar
DESCRIPCIÓN
Cobre recocido
Cobre estirado en frío
Acero revestido de cobre
Acero revestido de cobre. b
Aluminio, EC
Aluminio, aleación 5005
Aluminio aleación 6201
Acero revestido de aluminio
Acero, 1020
Acero inoxidable revestido. c
Acero galvanizado
Acero inoxidable 304

Seleccione Conductor.  
 Nota: Lista Desplegable

### Paso 3. Criterio de tensión de paso y choque.

El Aplicativo contiene dos botones de opción que permiten seleccionar el Criterio a utilizar para el cálculo de las Tensiones de Paso y Contacto.

En primera instancia solo contienen como dato de entrada el tiempo de choque, el cual ya se define para el cálculo del calibre del conductor.

Figura 15. Criterio de Tensión de Paso y Contacto. Aplicativo

CRITERIO DE TENSIÓN DE PASO Y CONTACTO (PASO 3)

☐

☒ Criterio de 50 Kg

☐ Criterio de 70 Kg

Criterio a utilizar

Peso Corporal 50 Kg

Descripción	Valor / Cantidad	Unidad
Tiempo de Choque, $t_c$	0,5	seg

CAPA SUPERFICIAL

Si va a utilizar Capa superficial en el terreno, digite los valores de profundidad de Capa superficial,  $h_s$ , y de Resistividad de la capa superficial  $\rho_s$ . Y seleccione la opción "Con capa superficial", de lo contrario, seleccione la opción "Sin capa superficial".

Descripción	Valor / Cantidad	Unidad
Profundidad de capa superficial, $h_s$		m
Resistividad de la capa superficial, $\rho_s$		$\Omega.m$

☐ Con Capa Superficial

☐ Sin Capa Superficial

ENVIAR DATOS

Para obtener otros parámetros se hizo necesaria la adición de una sección llamada, *Capa Superficial*, ya que esto afecta directamente los cálculos desarrollados. Se agregaron dos Botones de opción para seleccionar entre caso *Sin Capa Superficial* y *Con Capa Superficial*.

Para incluir capa superficial, digitar valores de profundidad de la capa superficial,  $h_s$  y de Resistividad de la capa Superficial y presionar el Botón "Con capa Superficial", de lo contrario, simplemente presionar el Botón "Sin Capa Superficial".

Figura 16. Capa superficial

**CAPA SUPERFICIAL**

Si va a utilizar Capa superficial en el terreno, digite los valores de profundidad de Capa superficial,  $h_s$ , y de Resistividad de la capa superficial  $\rho_s$ . Y seleccione la opción "Con capa superficial", de lo contrario, seleccione la opción "Sin capa superficial".

Descripción	Valor / Cantidad	Unidad
Profundidad de capa superficial, $h_s$		m
Resistividad de la capa superficial, $\rho_s$		$\Omega.m$

☐ Con Capa Superficial

☐ Sin Capa Superficial

ENVIAR DATOS

Se recuerda presionar el Botón "ENVIAR DATOS"

#### Paso 4: Diseño Inicial

Para lograr un Diseño Preliminar, los parámetros que se observan en la figura deben ser digitados:

Figura 16. Diseño Preliminar. Aplicativo

**DISEÑO PRELIMINAR (PASO 4)**

Descripción	Valor / Cantidad	Unidad
Distancia entre conductores, $D$		m
Profundidad de la malla, $h_m$		$\Omega.m$

**TIPO DE ARREGLO**

Escoja el tipo de arreglo a utilizar para el diseño preliminar del SPT.

Si va a utilizar el Diseño *Sin Varillas a tierra* solo seleccione la opción a continuación. De lo contrario digite los valores de  $n_r$  y  $L_r$  y seleccione la opción *Con Varillas a Tierra*.

Descripción	Valor / Cantidad	Unidad
Número de varillas a tierra, $n_r$		-
Longitud de cada varilla a tierra, $L_r$	2,5	m

☐ Sin varillas a tierra

☐ Con varillas en las esquinas

☐ Con varillas en esquinas y con o sin varillas en centro de la malla

ENVIAR DATOS

El valor de  $h_m$  no puede ser menor a 0,5 m (Valor predeterminado). En el caso de utilizar Capa superficial, sumar el espesor de la capa al valor de  $h_m$ .

"La Longitud mínima de la varilla a tierra es de 2,5 m"

Los parámetros en la figura son:

$D$ : Espaciamiento entre conductores paralelos, m.

$hm$ : Como valor de profundidad de la malla, sin tener en cuenta la profundidad de la capa superficial en caso de ser utilizada.

La sección “*Tipo de Arreglo*”, ha sido agregada por el impacto de las varillas sobre los cálculos del Conductor Total Utilizado y de la Resistencia de la Malla:

$L_C$ : Longitud total del conductor en la cuadrícula horizontal, m.

$L_R$ : Longitud total de varillas enterradas, m.

#### Paso 5: Calcular Resistencia de la malla


Para realizar el cálculo de la Resistencia de malla,  $R_g$ , no es necesario realizar la digitación de algún dato, pues los datos necesarios fueron digitados o calculados en el Paso anterior (Paso 4).

Si se quiere verifica el cálculo de  $R_g$ , Ir a la Hoja “Resultados Estudio Técnico”.

## Paso 6: Cálculo de corriente máxima a disipar por la malla, IG

Figura 17. Vista de Parámetros de entrada de Corriente a disipar

CÁLCULO DE MÁXIMA CORRIENTE A DISIPAR (PASO 6)		
Descripción	Valor / Cantidad	Unidad
Duración de la falla, $t_f$		seg
Número de líneas de Transmisión		-
Número de neutros de Distribución		-
Impedancia equivalente cables línea transmisión (R)		$\Omega$
Impedancia equivalente cables línea transmisión (X)		$\Omega$
Factor de División de Corriente, $S_f$		%

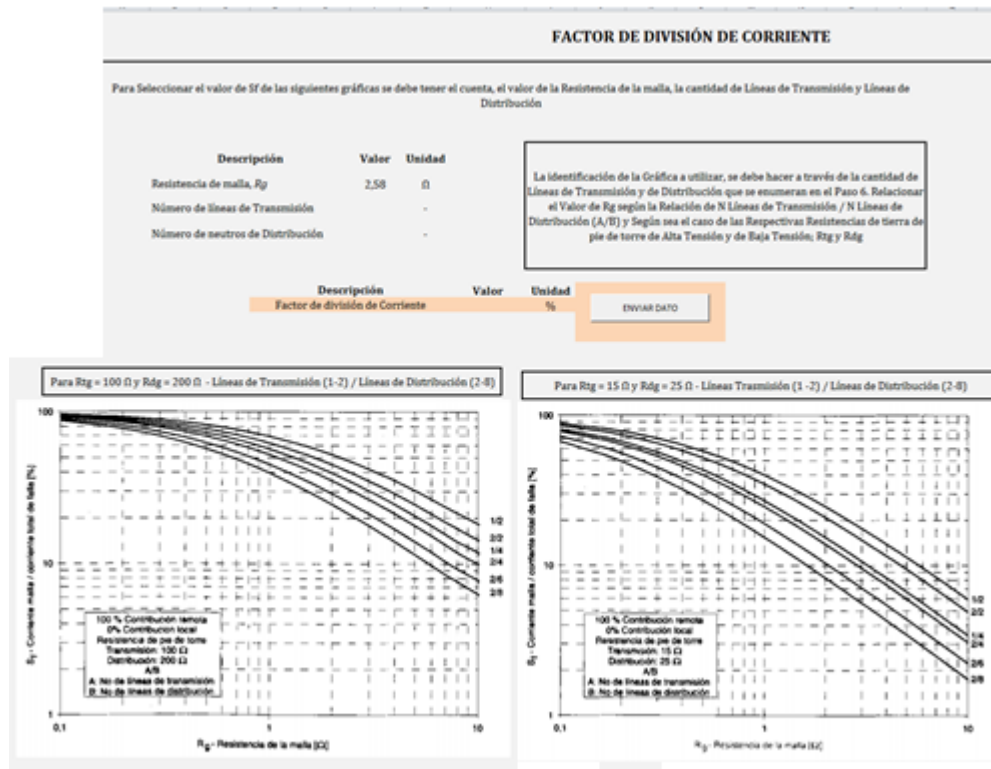
 [Para  \$S\_f\$](#)

[ENVIAR DATOS](#)

Para realizar el cálculo de la corriente máxima a disipar por la malla, los parámetros o variables que el aplicativo pide como entrada, son:

- Duración de falla,  $t_f$ . Dado en uno de los pasos anteriores.
- Número de líneas de transmisión
- Número de líneas de distribución
- Factor de División de Corriente,  $S_f$ . Para el caso de este parámetro, el aplicativo cuenta con un botón que redirige hasta una Hoja donde se encuentran las gráficas de  $S_f$  vs  $R_g$ . Y según la relación de Líneas de Transmisión / Líneas de Distribución, es posible determinar un valor de  $S_f$  adecuado, para continuar con los cálculos.

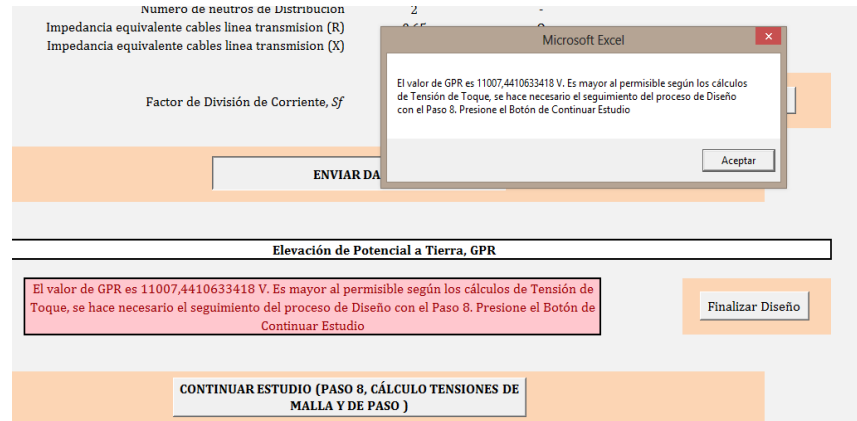
Figura 18. Factor de División de Corriente, Sf. **Hoja 2: Gráficas Sf.**



Paso 7: Cálculo del GPR (Elevación de Potencial a Tierra).

Para el caso del Paso 7, el aplicativo cuenta con una macro que permite realizar el cálculo y de inmediato hace una comparación con el valor correspondiente de  $E_t$ , calculado en el Paso 3. De ser el valor de GPR mayor, el aplicativo envía un mensaje como el siguiente.

Figura 19. Cálculo de GPR y comparación con valor de Et, calculado en el Paso 3.



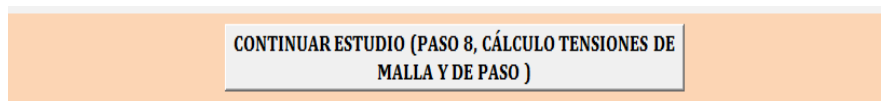
EL cálculo y comparación del Paso anterior, ofrecerá un cuadro de texto para indicar cuál es el próximo paso a seguir.

Si el mensaje es positivo, no se necesitan más cálculos y se presionar el Botón, “Finalizar Diseño”, Pero si sucede lo contrario, entonces se realiza el siguiente paso, presionando el Botón “CONTINUAR ESTUDIO (PASO 8, CÁLCULO TENSIONES DE MALLA Y DE PASO)”.

Paso 8: Cálculo de tensiones de retícula  $E_m$  y de paso  $E_s$ .

Dado el caso de no cumplirse el paso anterior. Y en esta ocasión nuevamente la aparición de un mensaje, permite conocer al usuario que esté utilizando el Aplicativo, darse cuenta si el valor de  $E_m$  cumple con el Criterio de  $E_t$  calculado en el **Paso 3**. Esto sucede con el solo hecho de presionar el botón:

Figura 20. Continuar estudio



Paso 9:  $E_m < E_{t\ 50\ o\ 70}$

En este paso se realiza la comparación entre la tensión de malla calculada con la tensión de contacto determinada en el **Paso 3**. En caso de que el valor de  $E_m$  sea mayor entonces se debe revisar el Diseño, **Paso 11**.

Al igual que en el **Paso 7**, saldrá un cuadro de texto, con los datos calculados comparados con la tensión de toque del **Paso 3**, Si el mensaje es positivo:

Avance al siguiente paso, pero si el mensaje es negativo, inmediatamente el archivo lo llevará hasta el **Paso 4**, para dimensionar nuevamente los valores de Diseño preliminar

Paso 10:  $E_s < E_{s\ 50\ o\ 70}$

Al igual que el Paso anterior, saldrá un cuadro de texto, con los datos calculados comparados con la tensión de paso del **Paso 3**, Si el mensaje es positivo:

Puede FINALIZAR ESTUDIO TÉCNICO DE MALLA, pero si el mensaje es negativo, inmediatamente el archivo lo llevará hasta el **Paso 11 (Paso 4)**, para dimensionar nuevamente los valores de Diseño preliminar

Paso 11: Modificación de parámetros de diseño inicial, Paso 4.

Si se llegase a exceder la tensión de paso y de contacto, es necesaria la revisión del diseño de la malla. Estas revisiones pueden incluir modificación de parámetros como lo son:

*D*: Espaciamiento entre conductores paralelos, m.



$L_C$ : Debido al uso de una Menor distancia entre las varillas o conductores, entonces  $L_C$  aumentará su valor.

$L_R$ : El efecto que tiene el uso de varillas o el aumento de varillas, genera una mayor longitud de varillas enterradas y por lo tanto mayores caminos para lograr la disipación de la corriente.

$h$ : Profundidad de conductores de la malla a tierra, m.

## Paso 12: FINALIZAR ESTUDIO DE LA MALLA

El último Botón de FINALIZAR ESTUDIO DE LA MALLA, nos abrirá la pestaña de “Resultados Estudio Técnico”

Recordando un poco acerca de esta hoja

Resultados Estudio Técnico. Esta hoja permitirá visualizar los datos calculados a partir de los ingresados en la hoja Ingreso de Datos, se podrá apreciar también la opción de imprimir los datos en un informe para la facilidad de dar a conocer los valores obtenidos.

Los parámetros de salida, que se pueden visualizar en la hoja de Resultados Estudio técnico, son:

Tabla 1. Parámetros de Salida

DESCRIPCIÓN	SIMBOLO	UNIDAD
Área	A	m <sup>2</sup>
Resistividad	$\rho$	$\Omega.m$
Profundidad de la primera capa	h1	m
Diámetro del conductor	dc	mm <sup>2</sup>
		kcmil
		m
Tensión de paso (según criterio)	Es	V
Tensión de contacto (Según criterio)	Et	V
Número de Conductores paralelos a Eje X	N	-
Número de Conductores paralelos al Eje Y	M	-
Longitud total de Conductor de la red	Lc	m
Longitud total de varillas	LR	m
Longitud total de conductor enterrado	LT	m
Resistencia de malla	Rg	$\Omega$
Máxima corriente a disipar	IG	A
Elevación de potencial a tierra	GPR	V
Tensión de la malla	Em	V
Tensión real de paso	Ep	V

¿NECESITA IMPRIMIR LOS DATOS?

La Hoja de Resultados de Estudio Técnico, cuenta con un Botón que le da la opción de imprimir los valores en general del Estudio Técnico en un formato, permitiendo observar, los parámetros de entrada y los calculados.

Figura 21. Hoja 3, Resultados Estudio Técnico

RESULTADOS DE ESTUDIO TÉCNICO			
<b>PASO 1, CÁLCULO DEL ÁREA Y LA RESISTIVIDAD</b>			
<b>Denominación</b>	<b>Valor / Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	
Área disponible para la malla	0,00	m²	
Resistividad aparente	10,00	Ω.m	
Profundidad de la primera capa, h	0,00	m	
<b>PASO 2, CÁLCULO DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR</b>			
<b>CONDUCTOR</b>	<b>Denominación</b>	<b>Valor / Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Cable cruzado	Calibre del conductor a utilizar		mm²
	Diametro del conductor, φc		mm
	Calibre del cable, AWG	Sección nominal, mm²	Diametro, mm
	2/0	67,42	0,0033
	0/0	85,00	0,004
	4/0	107,20	0,047
	250 kmil	126,65	0,047
	350 kmil	177,36	0,050
	500 kmil	252,4	0,060
<b>PASO 3, CRITERIO DE TENSION DE PASO Y CONTACTO</b>			
<b>Criterios utilizados</b>			
<b>Denominación</b>	<b>Valor / Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	
Criterio de Tensión de paso, $E_p$		V	
Criterio de Tensión de toque, $E_T$		V	
<b>PASO 4, DISEÑO PRELIMINAR</b>			
<b>Denominación</b>	<b>Valor / Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	
Distancia entre conductores en paralelo		m	
Número de Conductores paralelos al Eje X, $N_x$		-	
Número de Conductores paralelos al Eje Y, $N_y$		-	
Longitud total del conductor de la red, $L_c$	0,00	m	
Longitud total de conductores en la periferia, $L_p$		m	
Longitud total de varillas a tierra, $L_T$		m	
Longitud total de conductores enterrados, $L_E$		m	
<b>PASO 5, CÁLCULO DE RESISTENCIA DE LA MALLA, <math>R_g</math></b>			
<b>Denominación</b>	<b>Valor / Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	
Resistencia de la malla, $R_g$		Ω	
<b>PASO 6, CÁLCULO DE CORRIENTE MÁXIMA A DISIPAR POR LA MALLA, <math>I_G</math></b>			
<b>Denominación</b>	<b>Valor / Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	
Máxima Corriente a Disipar, $I_G$		A	
<b>PASO 7, CÁLCULO DE GPR Y COMPARACIÓN CON VALOR DE TENSION DE CONTACTO</b>			
<b>Denominación</b>	<b>Valor / Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	
Elevación de Potencial a Tierra, GPR		V	
<b>PASO 8, CÁLCULO DE LA TENSION DE MALLA Y TENSION REAL DE PASO</b>			
<b>Denominación</b>	<b>Valor / Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	
Tensión máxima de la malla, $E_m$		V	
Tensión real de paso, $E_p$		V	

IR A INGRESO DE DATOS

ESTUDIO ECONÓMICO

IMPRIMIR

## Hoja 4: Datos Estudio Económico

La hoja de Datos de estudio Económico, es un Diseño para complementar las actividades de Estudio Técnico, y permita conocer el valor de ciertas herramientas y parámetros calculados en el ámbito técnico.

En esta oportunidad digite los valores individuales de cada uno de los elementos utilizados en la instalación del sistema de puesta a tierra.

Figura 22. Datos Estudio Económico

Aplicativo SPTxism - Microsoft Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista Programador Foxit Reader PDF

Cambia 12 A A A Ajustar texto General Formato condicional como tabla Estilos Normal Buena Incorrecto Neutral Insertar Eliminar Formato Celdas Autosuma Refinar Borrar Ordenar y filtrar Buscar y seleccionar Modificar

Portapapeles Fuente Alineación Número

H47

PRECIOS			ELEMENTOS CALCULADOS EN EL ESTUDIO TÉCNICO		COSTO TOTAL
DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD	CANTIDAD	UNIDAD	\$
Variante de Cable	80.000,00	m	3,00	m	240.000,00
Conductor a utilizar	2.000,00	m	2,00	m	4.000,00
Soldadura Tipo Cadwell	3.000,00	-	1,00	-	4.000,00


HERRAMIENTAS Y EQUIPOS				
DESCRIPCIÓN	COSTO / DÍA	UNIDAD	DÍAS	\$
Herramienta menor	40.000,00	Caja	1	40.000,00
Cuadrilla listeros (OFICIAL+AYUDANTE)	800.000,00	Umd	2	1.600.000,00
Telurómetro	1.500.000,00	Umd	1	1.500.000,00

COSTO TOTAL \$

ESTUDIO ECONÓMICO

Ingreso de Datos Gráficas SF Resultados Estudio Técnico Datos Estudio Económico IMPRESIÓN

NOTA: El presente Estudio Económico, es un Diseño realizado para limitadas cosas. Es posible modificar solo los nombres y valores de las Herramientas y Equipos utilizados

	<b>NORMAS PARA LA ENTREGA DE TESIS Y TRABAJOS DE GRADO A LA UNIDAD DE INFORMACION</b>	<b>VERSION: 02</b>
		<b>FECHA: Junio 2012</b>
		<b>CODIGO:DOC-VACRE-NETGUDI</b>

**ANEXO 1**  
**CARTA DE ENTREGA Y AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO DE TESIS Y TRABAJOS DE GRADO.**

Barranquilla, Abril de 2014

Marque con una X  
 Tesis ☐ Trabajo de Grado ☒


Yo, TRONCOSO MENDOZA SONNI ALEXANDER Identificado con C.C. No. 1.140.851.521 de Barranquilla, actuando en nombre propio y como autor del trabajo de grado titulado “**APLICATIVO PARA EL ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPT) APLICANDO EL MODELO DE DOS CAPAS**”. Presentado y aprobado en el año **2014** como requisito para optar al título de **INGENIERO ELÉCTRICO**; hago entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos, en formato digital (DVD) y autorizo a la UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento. Y autorizo a la Unidad de información, para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad de la Costa, CUC, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en la página Web de la Facultad, de la Unidad de información, en el repositorio institucional y en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la institución y Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato DVD o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer. EL AUTOR - ESTUDIANTE, manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y detenta la titularidad ante la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, EL ESTUDIANTE - AUTOR, asumirán toda la responsabilidad, y saldrán en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos, la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Barranquilla D.E.I.P., el mes de Abril de Dos Mil Catorce 2014

**EL AUTOR – ESTUDIANTE** \_\_\_\_\_

**FIRMA**

	<b>NORMAS PARA LA ENTREGA DE TESIS Y TRABAJOS DE GRADO A LA UNIDAD DE INFORMACION</b>	<b>VERSION: 02</b>
		<b>FECHA: Junio 2012</b>
		<b>CODIGO:DOC-VACRE-NETGUDI</b>

## ANEXO 2

### FORMULARIO DE LA DESCRIPCIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO DE GRADO:

**APLICATIVO PARA EL ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPT) APLICANDO EL MODELO DE DOS CAPAS**

#### AUTOR

Apellidos Completos	Nombres Completos
TRONCOSO MENDOZA	SONNI ALEXANDER

#### JURADOS

Apellidos Completos	Nombres Completos
SILVA ORTEGA	JORGE IVAN
TORREGROZA ROSAS	MELISSA ISABEL

#### ASESOR


Apellidos Completos	Nombres Completos
HINESTROZA OLASCUAGA	LAURA

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO ELECTRICO

**FACULTAD:** INGENIERIA

**PROGRAMA:** Pregrado X Especialización \_\_\_\_

**NOMBRE DEL PROGRAMA:** INGENIERIA ELECTRICA

	<b>NORMAS PARA LA ENTREGA DE TESIS Y TRABAJOS DE GRADO A LA UNIDAD DE INFORMACION</b>	<b>VERSION: 02</b>
		<b>FECHA: Junio 2012</b>
		<b>CODIGO:DOC-VACRE-NETGUDI</b>

**CIUDAD:** Barranquilla **AÑO DE PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO:** 2014

**NÚMERO DE PÁGINAS** 124

**TIPO DE ILUSTRACIONES:**

- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Ilustraciones                | <input type="checkbox"/> Planos      |
| <input type="checkbox"/> Láminas                                 | <input type="checkbox"/> Mapas       |
| <input type="checkbox"/> Retratos                                | <input type="checkbox"/> Fotografías |
| <input checked="" type="checkbox"/> Tablas, gráficos y diagramas |                                      |

**MATERIAL ANEXO** (Vídeo, audio, multimedia o producción electrónica):

Duración del audiovisual: \_\_\_\_\_ minutos.

Número de casetes de vídeo: \_\_\_\_\_ Formato: VHS \_\_\_\_ Beta Max \_\_\_\_ ¾ \_\_\_\_ Beta Cam \_\_\_\_

Mini DV \_\_\_\_ DVCam \_\_\_\_ DVC Pro \_\_\_\_ Vídeo 8 \_\_\_\_ Hi 8 \_\_\_\_

Otro. Cuál? \_\_\_\_\_

Sistema: Americano NTSC \_\_\_\_ Europeo PAL \_\_\_\_ SECAM \_\_\_\_

**Número de casetes de audio:** \_\_\_\_\_

**Número de archivos dentro del DVD**

---

**PREMIO O DISTINCIÓN**

---

**DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:**

**ESPAÑOL**

Sistemas de Puesta a tierra

Mediciones

Corriente eléctrica

Resistividad del suelo

Modelo de suelo

Costos

**INGLÉS**

System of Earthing

Measurements

Electrical current

Resistivity of the soil

Model of soil

Costs